



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA ČEPU

MANUFACTURING OF A PIN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Glatteř

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jiří Glatte**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba čepu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh výroby součásti kruhovitého průřezu, která bude vyráběna víceoperačním protlačováním za studena. Na tuto problematiku bude také zaměřena literární rešerše i výpočty potřebné pro návrh a kontrolu nástroje. V tomto směru se rovněž počítá s ověřením návrhu užitím numerické simulace.

Cíle diplomové práce:

- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na technologii protlačování,
- zhodnocení možností výroby,
- návrh vhodné technologie a provedení technologických a kontrolních výpočtů,
- návrh nástroje společně s vyhotovením výkresů vybraných dílů.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William a Robert CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, xii, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0401-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

GLATTER, Jiří: Výroba čepu.

Práce předkládá návrh technologie výroby čepu ozubeného kola. Čep slouží k ustavení kola v kuželovém ložisku. Čep je vyroben z oceli 11 320.3 (11 320 5R), která je vhodná pro tváření za studena. Na základě studie problematiky tváření za studena a výpočtů byly zvoleny metody pěchování a protlačování. Nejčastěji je pro zhotovení použito více metod, jež jsou zprostředkovány sdruženým nástrojem. Může být též vyroben některou z obráběcích metod.

Klíčová slova: čep, ozubené kolo, ocel 11 320.3, tváření, mezní přetvoření, pěchování, protlačování,

ABSTRACT

GLATTER, Jiří: Manufacturing of a pin.

The work presents a proposal for the technology of production of a pin of gear assembly. The pin is used to position the wheel in a tapered roller bearing. Pin is made of 11 320.3 steel (11 320 5R), which is suitable for cold forming. Based on the study of cold forming and calculations, the methods of upsetting and extrusion were chosen. Most often, several methods are used for fabrication, which are mediated by a combined tool. It can also be made by any of the machining methods.

Keywords: pin, gear, steel 11 320.3, forming, marginal deformation, tamping, extrusion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GLATTER, Jiří. *Výroba čepu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132665>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Olomouci dne 21.5.2021

Jiří Glatter
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce, také děkuji své rodině, své přítelkyni, její mamince a kamarádům za podporu ve studiu i mimo něj.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Str.

ÚVOD	7
1 ROZBOR ZADÁNÍ	8
1.1 Možnosti výroby	9
2 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ	12
2.1 Zpevnění, plasticita a přetvoření	13
2.2 Metody objemového tváření za studena	15
2.3 Výpočty odporů a sil v operacích	18
2.3.1 Pěchování	19
2.3.2 Dopředné duté protlačování	22
2.3.3 Zpětné protlačování	22
2.4 Nástroje a nástrojové materiály	23
2.4.1 Pěchovací nástroje	24
2.4.2 Protlačovací nástroje	24
2.4.3 Nástrojivý materiál	28
2.5 Materiály pro objemové tváření	29
2.6 Technologičnost	31
2.7 Stroje pro tváření	32
3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY	34
3.1 Varianty technologického postupu výroby	34
3.2 Výpočty rozměrů polotovarů	39
3.3 Výpočty tvářecích sil a přetvárných prací	42
3.4 Volba stroje	50
3.5 Návrh nástroje pro 2. operaci	51
4 ZÁVĚRY	55

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD [1] [2] [3] [4]

Strojírenství vždy bylo a bude rychle se rozvíjejícím odvětvím. Je to dáno stále se zlepšujícím i postupy ve výrobě z mnoha rozličných materiálů. Výroba je zefektivňována, technologie jsou zpřesňovány. Přesto je stále kladen důraz na kvalitu materiálu i opracování.

Ve výrobě se často pracuje s polotovary různých tvarů – tyčové různých průměrů i průřezů, tabule plechů různých tloušťek. Z těchto tvarů vyplývá i různý způsob zpracování, ať už jde o lisování, ohýbání, stříhání, válcování, kování, tažení, pýchování či protlačování. Vždy se jedná o tváření materiálu a to buď plošné, nebo objemové.

Ve své práci jsem si zvolil zabývat se technologickou metodou výroby součástky pýchování a protlačování, i když často bývá použito více metod. Ty jsou prováděny sdruženým nástrojem, případně může být součástka vyrobena některou z obráběcích metod.



Obr. 1 Fotografie ozubeného kola a čepu

1 ROZBOR ZADÁNÍ [1], [2], [3],[4] [5] [6]

Řešenou součástí je čep ozubeného kola. Obecně jsou čepy využívány jako součást mechanismů sloužících k přenosu rotačního pohybu a síly. Jedním z jejich druhů jsou ozubená soukolí, jehož součástí je zadaný čep. Konkrétně se nachází v soukolí pily ocasky PFS 710 A1 značky Parkside, viz obrázek 2.

Ozubené soukolí zde slouží k převodu rotačního pohybu a síly elektromotoru na lineární pohyb listu pily. Jak je patrné z obrázku 3, čep je uložen v ložisku. Proti axiálnímu pohybu čepu jsou čepy zajištěny závlačka, kolíky, pojistnými kroužky apod. Reálná součást je zajištěna šroubem, kdy na obrázku 4 je vidět vnitřní závit.

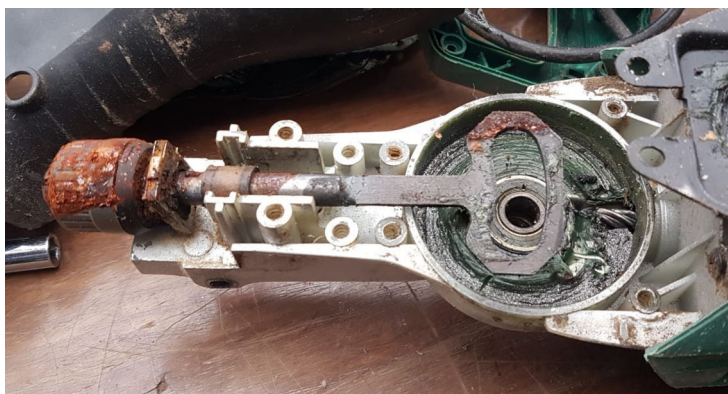
Čep je do ozubeného kola uložen s přesahem a je na něj nasunuta podložka. Model sestavy je zobrazen na obrázku 5.



Obr. 2 Pila ocaska PFS 710 A1

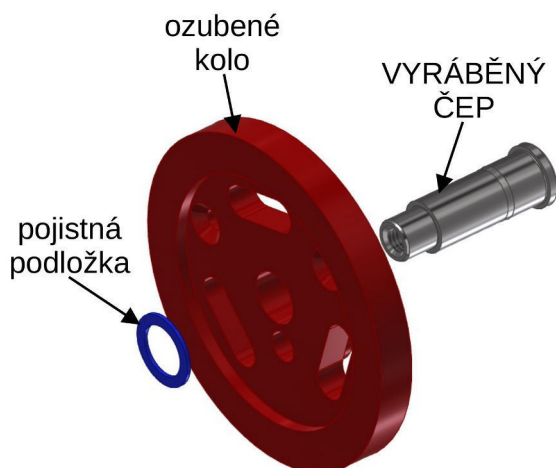


Obr. 4 Ozubené kolo s čepem

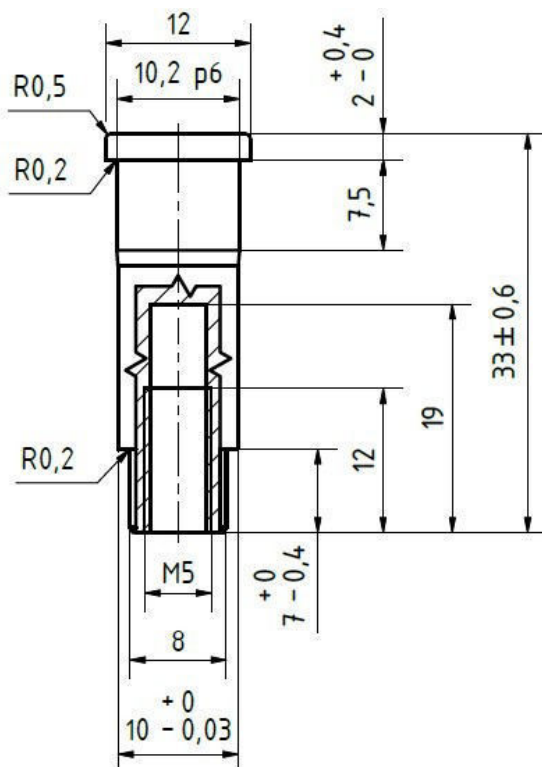


Obr. 3 Uložení ozubeného kola

Řešený díl je rotačního tvaru a je tvořen 3 hlavními částmi. Prvním je vnitřní závit, sloužící k zašroubování pojistného šroubu. Další je dřík o průměru 10 mm, na němž je uloženo ložisko. Dřík o průměru 10,2 mm společně s hlavou slouží k uložení do ozubeného kola. Rozměry čepu jsou uvedeny na obrázku 6.



Obr. 5 Model sestavy



Obr. 6 Rozměry součásti

Uložení čepu v ložisku umožňuje jeho rozebiratelnost, aby byla umožněna případná výměna, pokud by došlo např. k opotřebení zubů kola. Celková sériovost výroby je 700 000 ks.

Pro zadanou součást byl zvolen materiál ocel 11 320.3 (11 320 5R). Jedná se o nelegovanou normalizačně žíhanou ocel. Je vhodná pro objemové tváření za studena, díky svému nízkému obsahu uhlíku. Svařitelnost dané ocele je velmi dobrá. V tabulce 1 je vypsáno chemické složení oceli.

Tab. 1 Chemické složení oceli 13 320 5R. [5]

	Atest dle	C%	Mn%	Si%	P%	S%	Al%	Cr%	Cu%
Inspekční certifikát ŽDB	ČSN EN 10204	0,05	0,30	0,05	0,011	0,011			
VUT FSI ÚMI v Brně	Spektrometr LECO GDS 750	0,05	0,33	0,06	0,0,17	0,012	0,027	0,16	0,06

Vhodný materiál pro tváření je volen s ohledem na jeho mechanické vlastnosti. Tabulka 2 obsahuje hodnoty parametrů, které byli pro ocel 11 320 5R získány z polotovaru taženého drátu o průměru 15,5mm. Stejná vzorek materiálu byl také zkoumán Spektrometrem LECO GDS 750 ke zkoumání chemického složení.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 13 320 5R. [5]

		jednotky	11 320 5R
Mez kluzu	R_{p0,2}	MPa	589
Mez pevnosti	R_m	MPa	614
Tažnost	A₅	%	15,2
Tvrдость	HV	MPa	170
Kontrakce	Z	%	70,6
Modul pružnosti v tahu	E	GPa	201

1.1 Možnosti výroby [1] [4] [7] [8] [9] [10] [11] [12]

Při volbě nejvhodnější technologie výroby je nutné zvažovat několik faktorů. Důležitým je tvarová složitost vyráběného dílu, k níž se musí přihlídnout. Z hlediska použitelnosti a funkčnosti součásti jsou podstatné rozměry, jejich tolerance a jakost povrchu výsledného dílu. K jejich zajištění je někdy potřeba do výrobního procesu zařadit dokončovací operace. Vhodnou volbou by mělo být dosaženo maximálního využití materiálu, se kterým souvisí také celkový počet vyráběných dílů, tedy sériovost. Rozhodujícím faktorem mohou být i výsledné mechanické vlastnosti dílce.

Vyráběn bude čep se třemi dríky, který představuje rotační díl. Součástí výrobku je vnitřní závit, jeho Výrobu je také nutné brát v potaz a zvolit pro něj vhodnou technologii.

S přihlédnutím k rozhodujícím faktorům jsou zvažovány tyto technologie:

a) Obrábění – představuje jednu z nejrozšířenějších technologií. Při výrobním procesu dochází k oddělování materiálu polotovaru použitím řezného nástroje v podobě třísky. Na obrázku 7 lze vidět odběr třísky nástrojem. Polotovarem by byl špalík z tyčového materiálu o průměru větším, než je maximální průměr součásti. Samotný výrobní proces by byl uskutečněn na soustruhu nebo v CNC obráběcím centru, které umožňuje víceoperační obrábění. Oddělení materiálu můžeme využít výrobní stroj a upíchnout jej, nebo lze polotovar oddělit pomocí pily, či střížného nástroje. Následujícími výrobními operacemi by bylo obrobení vnějších rozměrů součásti, vyvrtání otvoru a obrobení závitu. Největší výhodou této metody je vysoká jakost a přesnost obrobených částí, proto bývá častokrát zařazena do výroby jako dokončovací operace. Další výhodou je flexibilita a víceúčelovost strojů a nástrojů pro další výrobní operace. Nehodí se však pro velkosériovou výrobu.



Obr. 7 Třískové obrábění [9]

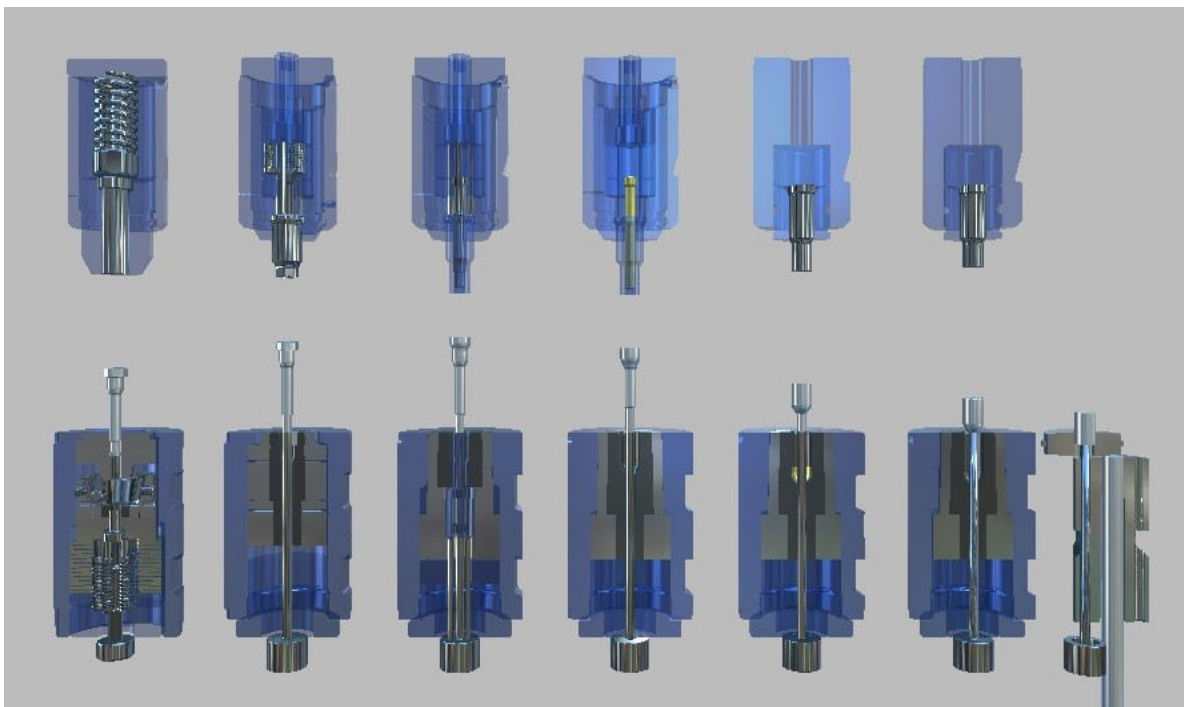
b) Tvářením za tepla – je proces výroby probíhající za vysoké teploty, zvýšení přispívá k lepší tvařitelnosti materiálu a obnově struktury. Lze tak dosáhnout vysokých hodnot přetvoření, aniž by byla porušena soudržnost materiálu. Nejvhodnější metodou je kování, při kterém je dosaženo změny tvaru pomocí statické síly lisu, nebo rázovou silou úderem beranu. Zadanou součást lze nejlépe vyrábět přesným kováním, či kováním na vodorovných lisech. Kování probíhá v uzavřených zápustkách bez výronku, kdy je nutné znát přesný objem polotovaru. Vyrobený díl má velkou přesnost a dobré mechanické vlastnosti, jelikož oproti obrábění nedojde k přerušení vláken. Největší výhodou je výše zmíněná schopnost dosahovat velkých deformací, díky čemuž je materiál efektivně využíván, snižuje se odpad. Technologie je vhodná pro sériovou výrobu.



Obr. 8 Kování součásti [10]

c) Tvářením za studena – je jednou z metod objemového tvářením, kde působením vnějších sil vzniká v materiálu vnitřní napjatost, která způsobuje přetvoření. Polotovar získává požadovaný tvar, přičemž není narušena soudržnost. Operacemi, nejvíce využívanými, jsou pýchování a protlačování, při je působící síla přenášena pomocí nástrojů. Na základě toku materiálu, je protlačování děleno na dopředné, zpětné, stranové a sdružené. Nejčastěji používanými stroji při tvářením za studena jsou tvářecí automaty. Konstrukčně se liší v závislosti na počtu operací, které v nich mohou být prováděny. Výhodami při tvářením za studena jsou

velmi dobrá přesnost rozměrů a jakost povrchu. Vysoká je i využitelnost materiálu a jsou zlepšeny mechanické vlastnosti materiálu. Výrobní časy jsou krátké a dochází k úspoře energie, což je vhodné pro velkosériovou výrobu. Na obrázku 9 jsou zobrazeny nástroje pro jednotlivé tvářecí operace v postupovém automatu.



Obr. 9 Schéma nástrojů v postupovém automatu [11]

Pokud by byl čep obráběn dosáhlo by se výborné jakosti povrchu a náklady na nástroj by byly mnohem nižší než při objemovém tváření. Vzhledem k velké sériovosti se náklady na nástroj vrátí, navíc využití materiálu je vyšší a jeho struktura není narušena. Lepších mechanických vlastností a dostatečné jakosti povrchu je možné dosáhnou objemovým tvářením za studena. Pokud by výroba probíhala za tepla, došlo by ke snížení tvářecí síly vlivem sníženého přetvárného odporu. Jakost povrchu by však byla snížena opalem a okujemi. Objemové tváření za studena představuje nejvhodnější metodu výroby zadaného čepu, proto je zvolena.

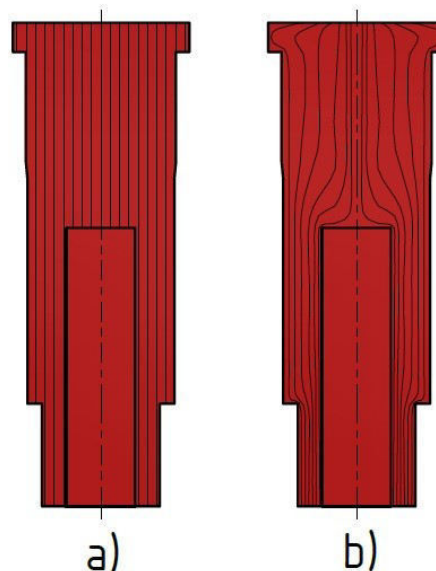
2 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ [1] [3] [4] [12] [13] [14] [15] [16] [17]

Tváření představuje technologický (výrobní) proces, při kterém je v materiálu vyvolána prostorová napjatost působením vnějších sil, vznikající dosažením napětí na hodnotě meze kluzu daného materiálu. Dosahuje se velkých hodnot přetvoření, které jsou získány za daných vhodných podmínek. K dosažení požadovaných rozměrů a tvaru je dosaženo bez odběru materiálu, jako při třískovém obrábění, čímž je dosaženo minimálního odpadu při výrobě. Průběh vláken v materiálu není narušen, pouze jsou přemístěny, a kopírují tvar součásti, viz obrázek 10.

Oproti vlastnostem výchozího polotovaru, dochází vlivem změny tvaru a deformací, ke zlepšení mechanických i fyzikálních vlastností. Lze tedy jakožto výchozí materiál využívat i méně hodnotné ocele.

Každá technologie je ovlivněna mnoha faktory. Při tváření jsou jimi především teplota a prostorová napjatost, podle nichž jsou jednotlivé technologické procesy tváření rozděleny. Rekrytalizační teplota představuje mezní hodnotu určující dělení jednotlivých procesů, při níž dochází k regeneraci deformovaných zrn. Výroba součásti tedy probíhá za studena, za poloohřevu, nebo za tepla.

Za studena jsou materiály tvářeny při teplotách nižších než je rekrytalizační (vzorec 2.1), při nich dochází ke zpevňování a čerpání plasticity.



a) obráběná součást

b) tvářená součást

Obr. 10 Průběh vláken

$$T \leq 0,3 \cdot T_{TAV} \quad (2.1)$$

kde: T je teplota tváření [°C],
 T_{TAV} je teplota tavení [°C].

Pokud dojde k vyčerpání plasticity, je nutné do výrobního procesu zařadit mezioperační žihání, aby došlo k obnovení plastických vlastností. Dochází k obnově deformovaných zrn na nedeformovaná, čímž se obnoví struktura. Rekrytalizační teplotu lze určit vztahem (2.2) dle Bočvara, na základě teploty tavení materiálu.

$$T_{REK} = (0,35 \div 0,40) \cdot T_{TAV} \quad (2.2)$$

kde: T_{REK} je rekrytalizační teplota [°C].

Výroba za poloohřevu probíhá pod teplotou rekrytalizace, avšak lze ji dosáhnout vyšších hodnot přetvoření bez nutnosti užití mezioperačního žihání. Nedochází k obnově deformovaných zrn, ale vyšší plasticita je podporována vzájemným vyrušením a snížením počtu dislokací v mřížce (anihilací). Přetvárný odpor a míra přetvoření je zde oproti tváření za studena nižší, ale ke zpevňování dochází také. Příkladem je navýšení tažnosti o 20 až 30% u nízkouhlíkové oceli při 200 °C.

Pokud jsou teploty vyšší než rekrytalizační, jedná se o tváření za tepla. Deformovaná zrna jsou pravidelně obnovována, čímž lze dosáhnout prakticky neomezeného přetvoření. Riziko a nežádoucí efekty u vysokých teplot představuje možnost vzniku okují na povrchu, oxidizování a oduhlíčení materiálu. Přílišná výdrž na dané teplotě vytváří v materiálu hrubé zrno.

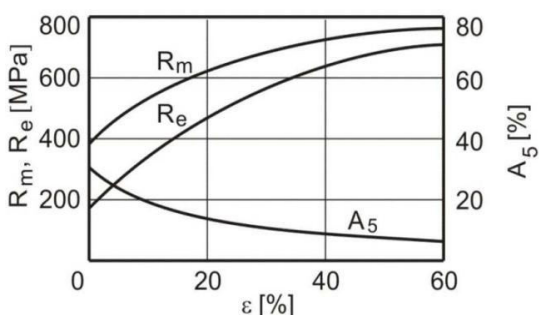
Tvářecí procesy jsou často rozděleny podle převládajícího stavu napjatosti. Pokud je převládající rovinný stav napjatosti, je dosaženo tvaru bez podstatné změny průřezu

polotovaru. Jedná se o procesy plošného tváření, mezi které patří lisování, tažení, ohýbání a střihání. Druhým stavem napjatosti je prostorový, při němž dochází k všestrannému přemísťování materiálu a průřez polotovaru se mění. Jsou to procesy objemového tváření, zde patří válcování, kování, protlačování, pěchování a protahování.

2.1 Zpevnění, plasticita a přetvoření [1] [4] [11] [12] [14] [16] [17] [18]

Materiál zpevňuje především při výrobě tváření za studena. Je důsledkem plastické deformace, při níž dochází k pohybu dislokací a mřížkových poruch. Dislokace se kumulují, přičemž jejich zvýšená hustota prání v pohybu ostatním a zvyšuje se hodnota přetvárného odporu. K dosažení následujícího přetvoření je zapotřebí větší síly.

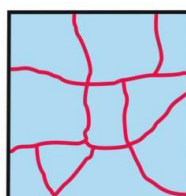
Společně se zpevňováním dochází ke změnám mechanických a fyzikálních vlastností. U hodnot tvrdosti a pevnosti dochází k nárůstu, tažnost potažmo plastičnost se snižuje. Obrázek 11 představuje diagram popisující závislost experimentálně zjištěných hodnot mechanických vlastností na deformaci. Vyčerpáním plasticity může být způsoben lom materiálu.



Obr. 11 Diagram závislosti mechanických hodnot na deformaci [1]

Dalším průvodním jevem je změna tvaru zrn. Dochází k jejich protažení ve směru pohybu materiálu v tvářecí operaci, vytváří se textura, viz obrázek 12.

Fyzikální změny vlastností představují zvýšení hustoty, snížení permeability a ztráta odolnosti vůči korozi.



a) zrna před tvářením



b) zrna po tváření

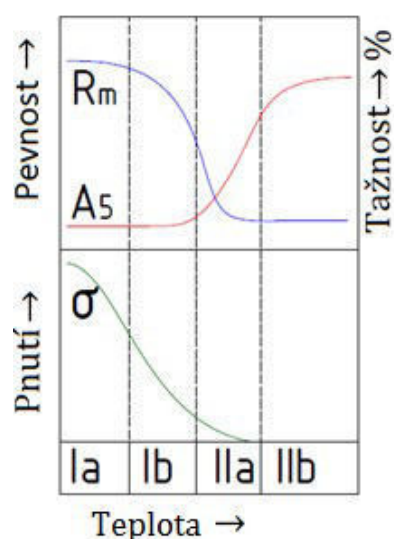
Obr. 12 Změna tvaru zrn tvářením [12]

Zpevnění představuje pozitivní i negativní faktor při tváření. Lze jej využít k úpravě vlastností materiálu s cílem navýšení jeho pevnosti a odolnosti. Zároveň však představuje nebezpečí, kdy dojde k porušení a lomu. Při víceoperačních výrobních procesech je nutné sledovat hodnotu přetvoření, pokud by mělo dojít k vyčerpání plasticity, je nutné zotavovací operací obnovit její zásobu.

K metodám používaným pro odpevnění materiálu patří zotavení. Probíhá při teplotách nižších než rekrytalizační. Zrna si zachovávají svůj deformovaný tvar, avšak je umožněn pohyb dislokací, které se anihilují. Výrazně se sníží zbytkové pnutí.

Obnovy plasticity lze dosáhnout rekrytalizačním žháním, kdy se mění celá deformovaná struktura na nedeformovanou, ale nedochází k překrytalizaci. Nukleací vznikají nová zrna, která dále rostou. Rekrytalizace probíhá izotermickým ohřevem na rekrytalizační teplotu. Proces je závislý i na době setrvání na dané hodnotě, která se snižuje, pokud roste přetvoření. Zvýšení teploty zkracuje nutnou dobu výdrže.

Během tváření za tepla dochází k dynamickému odpevnění, jehož pochody závisí na teplotě. S jejím nárůstem



Ia) zotavení Ib) polygonizace IIa), IIb) rekrytalizace

Obr. 13 Vliv teploty na mechanické vlastnosti [1]

se procesy zrychlují. I zde probíhá nukleace a růst nových zrn. Probíhá až po překrytí a zpevnění a odpevnění jsou při procesu tváření v rovnováze.

Ke zjištění průběhu zpevnění v reálných termodynamických podmínkách určující chování materiálu slouží křivky zpevnění. Představují závislost deformace na skutečných napětích. Jednotlivé průběhy jsou zjišťovány zkouškami jednoosé napjatosti, v praxi jsou nejčastěji používané pýchovací a tahová zkouška.

Jednotlivé křivky závisí na oblasti sledované deformace, dělí se na:

- Křivky I. duhu $\sigma(\epsilon)$ – sledovanou oblastí jsou elasticko-plastické deformace, následující vztah (2.3) slouží k určení poměrného přetvoření:

$$\epsilon = \frac{S_0 - S}{S_0} \quad [-] \quad (2.3)$$

kde: S_0 je obsah průřez zkušební vzorku [mm^2],

S je okamžitý obsah průřezu zkušební vzorku [mm^2].

- Křivky II. druhu $\sigma(\varphi)$ – zabývají se pouze oblastí plastických deformací, zde určené přetvoření je logaritmické, vypočítané vtahem (2.4):

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} \quad [-] \quad (2.4)$$

Tab. 3 Mezní hodnoty deformací při různých způsobech tváření. [1]

Způsob tváření		Změna průřezu		Změna výšky	
		ϵ [%]	φ [%]	ϵ [%]	φ [%]
Zpětné protlačování		40 až 75	0,51 až 1,4	-	-
Dopředné protlačování	uzavřené	30 až 90	0,37 až 3,0	-	-
	volné	5 až 30	0,05 až 0,37	-	-
pýchování		-	-	40 až 80	0,51 až 1,61

Tahovou zkouškou je získán pracovní diagram závislosti napětí na deformaci, který je použit pro zhodnocení mechanických vlastností materiálu. Významnými body sledovanými na křivce zpevnění jsou např. mez kluzu a mez pevnosti v tahu. První jmenovaná představuje mezní hodnotu napětí, při níž se přechází z oblasti pružných (elastických) deformací do oblasti plastických. Pokud je výrazná, značí se R_e , je odečtena přímo z diagramu. Pro nevýraznou (smluvní) mez kluzu, značenou $R_{p0,2}$, je hodnota zjištěna graficky, odpovídající 0,2 % trvalé deformaci. Jednotlivé křivky zpevnění jsou zobrazeny na obrázku 14.

Druhá sledovaná hodnota, mez pevnosti, představuje smluvní hodnotu vypočtenou podle vztahu (2.5):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.5)$$

kde: F_m je nejvyšší dosažená síla před přetržením drátu [N].

V bodě dosažení meze pevnosti dochází ke změně průběhu deformace podél osy z homogenní na heterogenní. Zkušební vzorek se v lokální oblasti ztenčuje a vzniká tzv. krček. Následným zatěžováním je vzorek porušen (přetržen).

Plasticita materiálu je zjišťována pomocí základních ukazatelů, kterými jsou tažnost A_T , vypočtená vztahem (2.6) a kontrakce Z , pro níž je uveden vztah (2.7).

$$A_T = \frac{L_U - L_0}{L_2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.6)$$

kde: L_0 je počáteční délka vzorku [mm],
 L_U je konečná délka vzorku [mm].

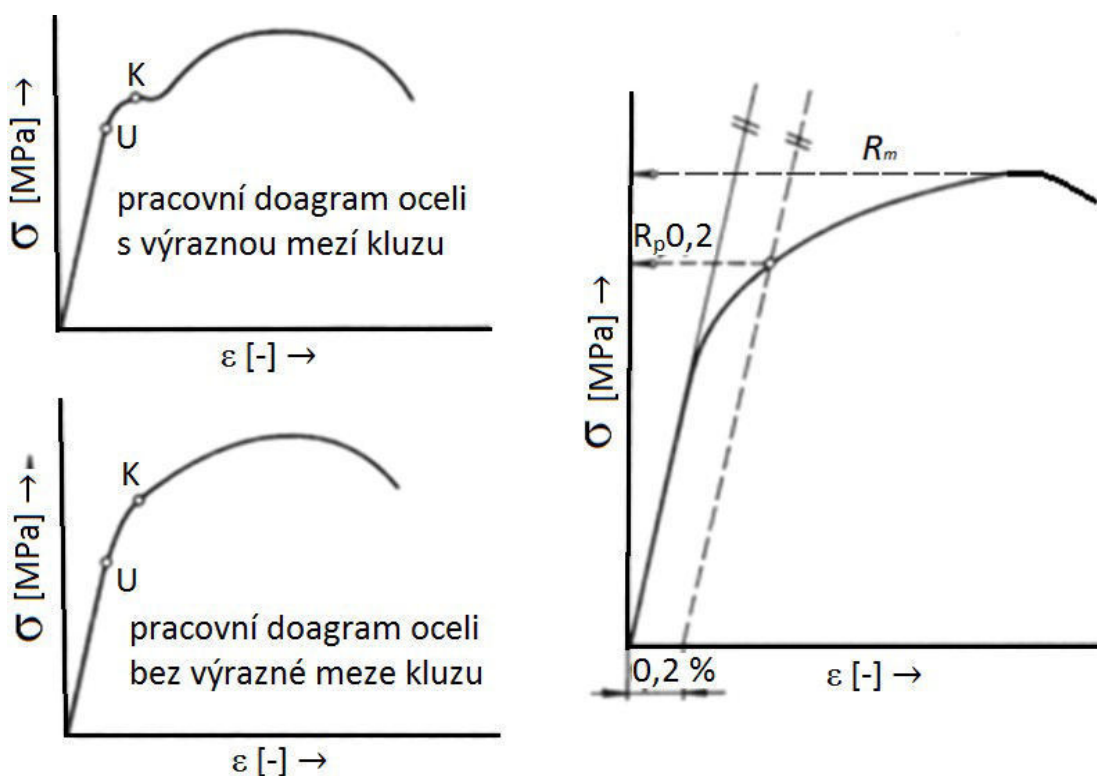
$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S_U} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

kde: S_U je konečný průřez vzorku [mm²].

Výpočtem poměru napětí na mezi kluzu a mezi pevnosti určíme zpevnění materiálu, kdy materiály s vysokou plasticitou vyhovují vztahu (2.8).

$$\frac{R_e}{R_m} \leq 0,65 \quad (2.8)$$

Pro výrobu přesných součástí menších a symetrických rozměrů jsou nejčastěji využívány tvářecí operace pěchování a protlačování.



Obr. 14 Diagrami s výraznou a nevýraznou mezí kluzu [10]

2.2 Metody objemového tváření za studena [1] [2] [4] [13] [15] [17] [19] [20]

Pro výrobu součástí čepového tvaru, či spojovacích součástí jsou nejvhodnějšími a nejpoužívanějšími metodami pěchování a protlačování, vyznačující se vhodností použití při hromadné a velkosériové výrobě. Zajišťují výsledné součásti velmi dobrou tvarovou přesnost a jakost. Velmi ceněnou vlastností je schopnost dosažení velké prostorové napjatosti, podstatné pro dosažení značného přetvoření. Zároveň však zachovávání průběh vláken napříč průřezem součástí.

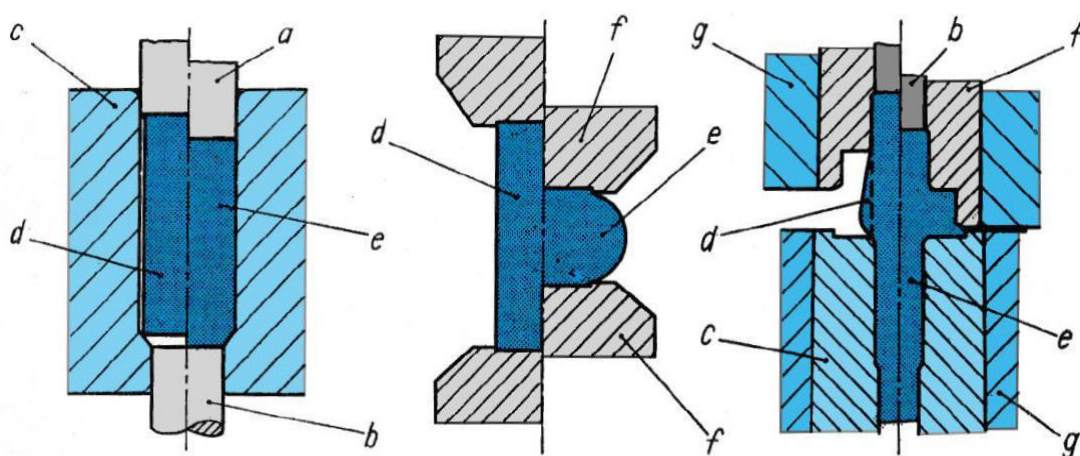
a) Pěchování – představuje jednu ze základních operací objemového tváření. Principem je stlačování polotovaru, přičemž dochází ke snížení výšky polotovaru za současného zvětšení

příčného průřezu, jelikož objem tvářeného tělesa je konstantní. Pěchovat lze mezi rovnoběžnými rovinami (deskami), jedná se o volné pěchování. Součást může být tvářena v dutině lisovnice, či v dutině lisovníku, zde se pěchování označuje jako uzavřené. Pohyb nástroje probíhá podél osy tvářeného dílce do doby, dokud výsledná výška neodpovídá požadovanému rozměru.

Na obrázku 15 jsou znázorněny schémata, možných provedení.

Pěchování je nejčastěji použito pro výrobu normalizovaných spojovacích součástí, jako jsou šrouby, matice, náty, čepy atp.

Pokud vyrábíme tvarově složitější součásti je tato metoda využívána pro kalibraci špalíku, aby byly zarovnané čela, které jsou deformovány při stříhu. Setkáváme se s ní jakožto s přípravnou operací, kdy je přizpůsobován tvar součásti pro další operace. Pěchování je často kombinováno s jinými metodami při víceoperačním tváření.

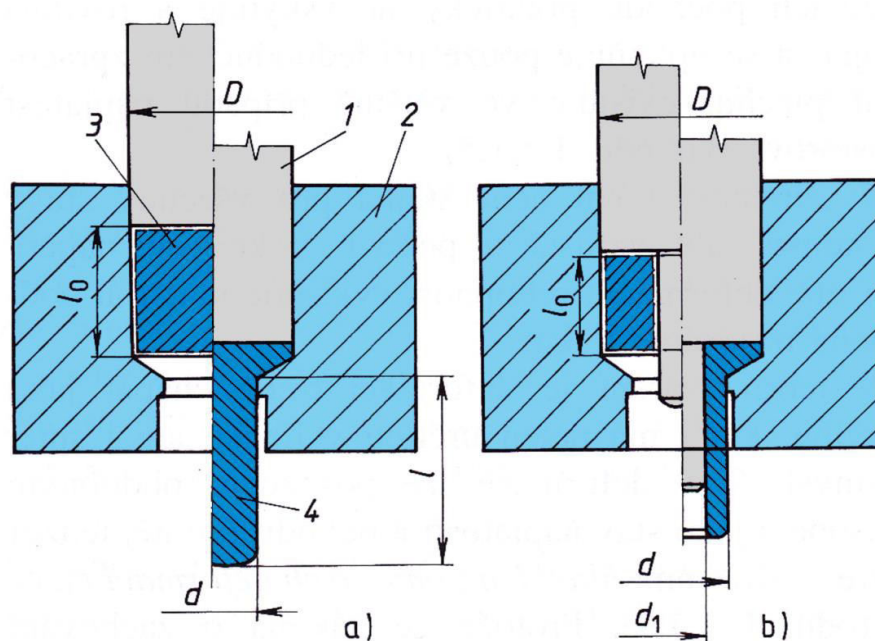


a – průtlačník, b – vyhazovač, c – průtlačnice, d – plotovar,
e – pěchovaný díl, f – lisovník, g – objímka

Obr. 15 Schéma pěchování [19]

Při vyhodnocování tvařitelnosti materiálu je častokrát použita tzv. pěchovací zkouška. Při této zkoušce je zjišťován deformační odpor (σ_d) a přirozený přetvárný odpor (σ_p) v závislosti na logaritmické deformaci vzorku.

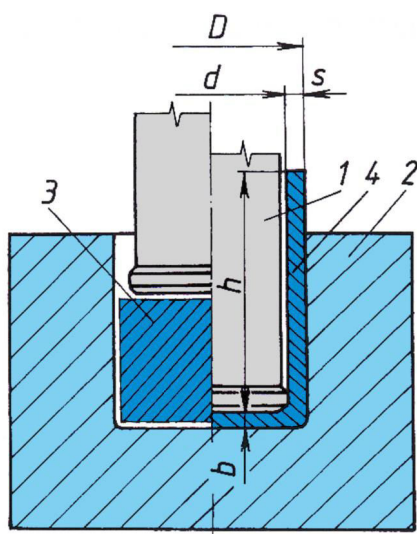
b) Dopředné protlačování – obecně je při procesu protlačování na polotovar vyvíjen značný tlak vyvolávající velmi velkou prostorovou napjatost. Dochází k velkým deformacím zapříčiňujícím tzv. tečení materiálu, dosahuje plastického stavu. Při dopředném protlačování se materiál pohybuje ve směru pohybu nástroje (průtlačníku), který jej vtlačí do průtlačnice. Při průchodu redukčním otvorem, dochází ke změně průřezu na požadovanou hodnotu. Tvářenému dílci se říká průtlaček. Dopředně protlačovat lze průtlačky plného průřezu i duté díly. Nejčastějším polotovarem jsou špalíky získané ustřížením z tyčového materiálu. Dutá tělesa lze protlačovat se dnem i bez něj. Jako polotovary jsou voleny špalíky, kalíšky, či prstence. K vyjmutí průtlačku slouží vyhazovače, případně mohou být vytlačeny následující vyráběnou součástí. Schéma dopředného protlačování plných i dutých dílů je zobrazeno na obrázku 16.



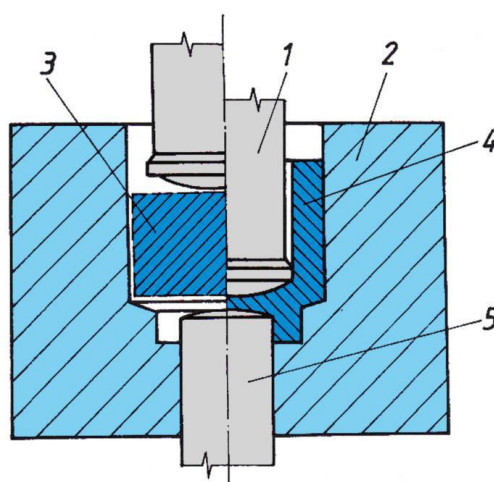
a) protlačování plného tělesa, b) protlačování dutého tělesa
1 – průtlačník, 2 – průtlačnice, 3 – polotovar, 4 – protlaček

Obr. 16 Schéma dopředného protlačování [19]

b) Zpětné protlačování – je charakterizovatelné podle toku materiálu stejně jako u předchozí metody. Při dosažení potřebného napětí se materiál pohybuje proti směru pohybu průtlačníku, který je konstruován s průměrem menším než průměr průtlačnice. V průběhu procesu je vtlačován do materiálu a rozměry nástrojů zajišťují volný pohyb materiálu mezerou mezi nástroji. Na obrázku 17 je patrné tečení materiálu směrem nahoru. Jelikož musí být zachován objem polotovaru, roste výška stěn průtlačku v závislosti na snižování počáteční výšky polotovaru. Výsledným průtlačkem může být díl tvaru kalíšku, kdy polotovarem je špalík, nebo dílec s průchozím otvorem, tvářený z prstencového polotovaru.



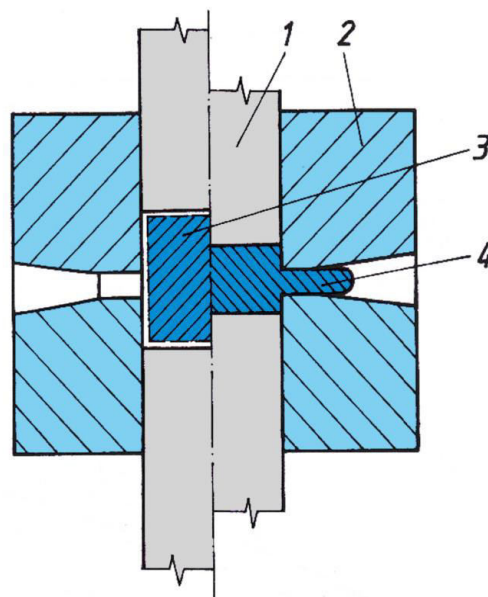
1 – průtlačník, 2 – průtlačnice,
3 – polotovar, 4 – protlaček



1 – průtlačník, 2 – průtlačnice,
3 – polotovar, 4 – průtlaček,
5 – vyhazovač

Obr. 17 Schéma zpětného protlačování [19] Obr. 18 Schéma sduženého protlačování [19]

c) Sdružené protlačování – představuje kombinaci procesů dopředného a zpětného protlačování. K tečení materiálu dochází ve směru i proti směru pohybu nástroje. Nástroj nejdříve vtlačuje materiál do tvarové dutiny v průtláčnici, po jejím zaplnění je vytlačován ven mezerou mezi nástroji. K zajištění úspěšného procesu výroby je nutné dodržet zásadu pro stupeň přetvoření. Pro dopředné protlačení by měl být stupeň přetvoření nižší, v krajním případě stejný jako u zpětného. Kombinace tvářecích metod přispívá k vyšší efektivitě výrobního procesu. Pro tváření dílec platí zákon zachování objemu, stejně jako u všech metod objemového tváření za studena.



1 – průtláčník, 2 – průtláčnice,
3 – polotovar, 4 – protlaček

Obr. 19 Schéma stranového protlačování [19]

d) Stranové protlačování – principem je opět vyvinutí tlaku pomocí nástrojů. Při tečení materiálu je přemísťován směrem do stan (kolmo na osu), tok není shodný se směrem pohybu průtláčníku. Materiál je zatěžován tvářecí silou ze dvou stran. Průtláčnice je dvoudílná, konstruována s tvarovou mezerou. Na výsledné součásti se budou nacházet stopy po dělicí rovině. Metoda je používána pro vytvoření nejružnějších výstupků na obvodu, přírub atp.

2.3 Výpočty odporů a sil v operacích [1] [4] [22]

Jedním ze základních parametrů tvářecích strojů je jejich jmenovitá síla, která je využita ve tvářecích operacích k dosažení přetvoření materiálu součástí. Vhodný stroj je volen na základě vypočtené hodnoty tvářecí síly ve všech operacích. Sílu lze vypočítat pomocí základního vztahu (2.9), kdy nejčastěji užívaným odporem je deformační:

$$F = \sigma \cdot S \quad [\text{kN}] \quad (2.9)$$

kde: F je tářecí síla [kN],
 σ je odpor materiálu [MPa],
 S je plocha průřezu tvářeného dílu [mm²].

Výpočet síly potřebné pro jednotlivé operace vychází ze znalosti přetvárných odporů. Z experimentů jsou získány křivky, pracovní diagramy tahových a tlakových zkoušek, z nichž je možné určit velikosti přirozených přetvárných odporů. Mohou být rovněž vypočteny užitím rovnic odpovídajících danému materiálu. Hodnota deformačního přetvárného odporu odpovídá přirozenému přetvárnému odporu navýšeným o hodnoty zahrnující technologické vlivy, jimiž jsou především tření, deformační rychlost, nebo změna teploty.

Nejvhodnější metodou použitou pro výpočty je analytická metoda rovinných řezů. Je to inženýrská metoda, při níž jsou použity přibližné diferenciální rovnice pro výpočty odporů a sil. Ke zjednodušení výpočtu jsou zavedeny zjednodušení:

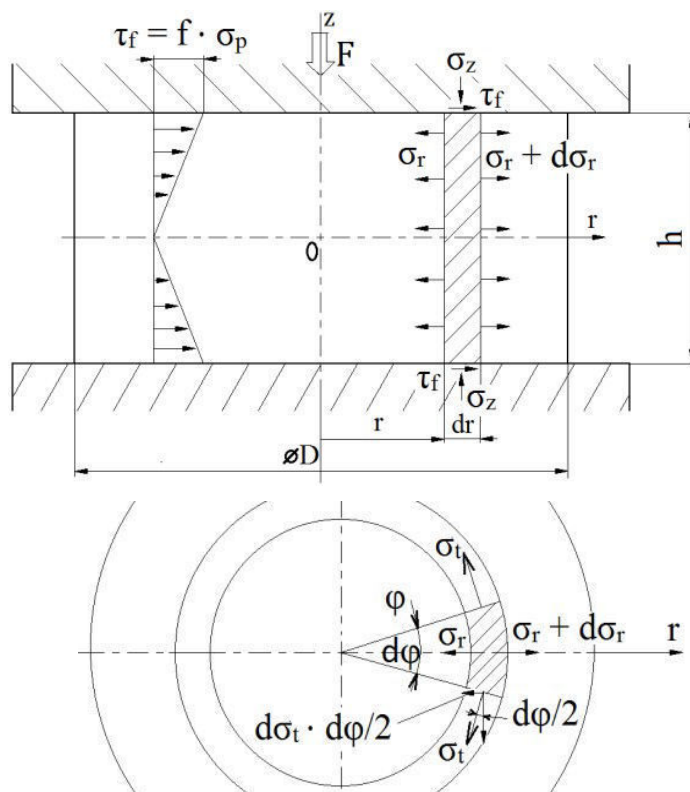
- a) tvářený materiál je brán jako spojité isotropní kontinuum
- b) směry souřadných os jsou totožné se směry hlavních napětí v tvářené součásti ve všech bodech
- d) prostorová napjatost i přetvoření jsou převáděny na osově souměrné a rovinné úlohy

- e) tření je uvažováno jen na stykové ploše nástroje s materiálem
f) deformace i rychlosti jsou určeny na základě smluvních vztahů jen pro vyjmutý element tělesa

Jednotlivé výpočty se liší pro konkrétní metody tváření.

2.3.1 Pěchování

Pokud je pěchováno válcové těleso, viz obrázek 22, jehož průměr je značně větší oproti výšce, je možné uvažovat tok materiálu za rovnoměrný ve směru do stran. Tímto zjednodušením napětí σ_z , σ_r , σ_t , nejsou závislé na souřadnici osy "z" ($d\sigma_z / \sigma_z = 0$). Díky válcovému tvaru je tečné napětí σ_t nezávislé na souřadnicovém úhlu φ , zároveň platí $\tau_{r\varphi} = \tau_{z\varphi} = 0$. Z podmínky rovnováhy sil na elementu ve směru poloměru "r" vycházejícím ze schématu (Obr. 20) je obdržena rovnice (2.9).



Obr. 20 Schéma napjatosti při pěchování válcového tělesa [1]

$$\sum F_r = \sigma_r \cdot h \cdot d\varphi - (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) \cdot h \cdot d\varphi + 2\sigma_\varphi \cdot h \cdot dr \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} - 2\tau_f \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr = 0 \quad (2.9)$$

kde: σ_r je radiální napětí [MPa],
 σ_t je tečné napětí [MPa],
 τ_f je tření dle Coulomba[-],
 h je výška pěchovaného tělesa [mm],
 r je poloměr pěchovaného tělesa [mm],
 $d\varphi$ je úhel, ve kterém se nachází počítaný element [°].

Následně je rovnice je roznásobena vztahem " $\frac{1}{h \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr}$ ", a je obdržen vztah (2.10):

$$-\frac{\sigma_r}{dr} + \frac{(\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr)}{r \cdot dr} - \frac{2\sigma_t \cdot \sin \frac{d\varphi}{2}}{r \cdot d\varphi} + \frac{2\tau}{h} = 0$$

Sinus malého úhlu " $\sin \frac{d\varphi}{2}$ " je možné přepsat na " $\frac{d\varphi}{2}$ ", rovnice je dále roznásobena

$$-\frac{\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r + r + \sigma_r \cdot dr + d\sigma_r \cdot r + d\sigma_r \cdot dr}{r \cdot dr} - \frac{2\sigma_t \cdot \frac{d\varphi}{2}}{r \cdot d\varphi} + \frac{2\tau}{h} = 0$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} + \frac{2\tau}{h} = 0 \quad (2.10)$$

Jelikož se jedná o úlohu rotačně symetrickou, jsou i její deformace rotačně symetrické $d\varepsilon_\varphi = d\varepsilon_r$. Schodně se rovnají i tečné a radiální napětí $\sigma_r = \sigma_t$. Tyto podmínky dovolují diferenciální rovnici (2.10) dále zjednodušovat na tvar (2.11a), jelikož “ $(\sigma_r - \sigma_t)/r = 0$ ”. Jelikož v celém objemu součásti dochází k přetvoření, musí být podmínka plasticity maximálních smykových napětí $\tau_{\max}(\sigma_r - \sigma_z = \sigma_p)$ splněna i na stykových plochách. Následnou derivací dle poloměru “ r ” ($d\sigma_z/dr = d\sigma_r/dr = 0$) je obdržen vztah (2.11b). Tyto vztahy jsou potřebné pro řešení dle Siebela, které na ně navazuje.

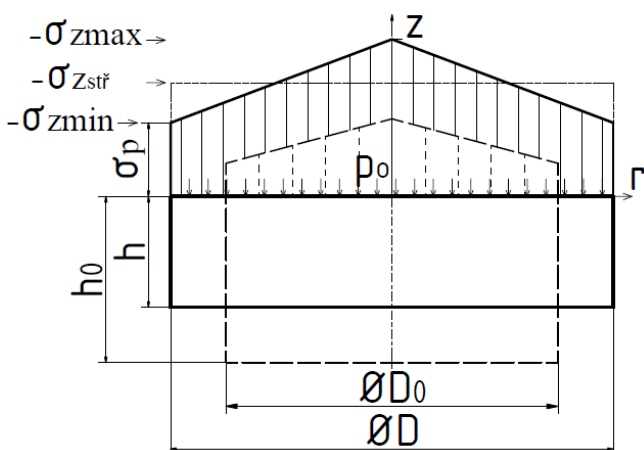
$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\tau_f}{h} = 0 \quad (2.11a) \quad \frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2\tau_f}{h} = 0 \quad (2.11b)$$

Řešení dle Siebela vychází z rovnice (2.11b) a zavádí předpoklady pro normálové napětí σ_z , které má při pēchovacím procesu stejnou hodnotu v celé výšce. Zároveň smykové kontaktní napětí vychází ze zákona tření dle Coulomba (2.12). Rozložení napětí je zachyceno na obrázku 21.

$$\tau_f = f \cdot \sigma_z = -f \cdot \sigma_p \quad (2.12)$$

kde: f je součinitel tření [-].

Dosazením podmínek a následným roznásobením vztahu (2.11b), který je dále upravován, lze získat vztah pro přirozený přetvárný odpor (2.13). Podrobné řešení je uvedeno v příloze_siebel.



Obr. 21 Rozložení osového napětí dle Siebela [1]

$$\sigma_d = -\sigma_{z, stř} = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h}\right) \quad [\text{MPa}] \quad (2.13)$$

kde: D_p je průměr pēchované součásti [mm]

f je součinitel tření [-]

h je výška průtlačku [mm]

σ_p je přirozený přetvárný odpor [MPa].

Tento vztah předpokládá znalost přirozeného přetvárného odporu, při tváření dochází ke změně jeho velikosti společně s měnícím se přetvořením. Jeho hodnota může být vypočtena pomocí experimentálně získaných křivek zpevnění. Pro takový výpočet jsou používány matematické funkce (polynom 3., 5., až n -tého stupně). Příkladem je vztah (2.14).

$$\sigma_p = a_5 \cdot \varphi^5 + a_4 \cdot \varphi^4 + a_3 \cdot \varphi^3 + a_2 \cdot \varphi^2 + a_1 \cdot \varphi + a_0 \quad [\text{MPa}] \quad (2.14)$$

kde: A_{1-5} jsou konstanty polynomu.

Jinou metodou k získání přetvárného odporu je vztah dle Johnson-Cooka (2.15). Je v něm zahrnuta velikost přetvoření, přetvárná rychlost i teplota procesu. Užití tohoto vztahu je vhodné pro materiály, která mají mřížku BCC.

$$\sigma_p = (\sigma_0 + B \cdot \dot{\varphi}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0}\right)\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{TAV} - T_0}\right)^m\right] \quad [\text{MPa}] \quad (2.15)$$

kde: $\dot{\varphi}_0$ je referenční rychlost deformace [s^{-1}] a vypočte se vztahem:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dh}{h} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{v_0}{h} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2.16)$$

kde: $d\varphi$ je přírůstek logaritmické deformace [s^{-1}],

dt je přírůstek času [s],

dh je změna výšky součásti [mm],

v_0 je okamžitá rychlost pohybu nástrojem [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

h je vztažená výška [mm],

$\dot{\varphi}_0$ je efektivní logaritmická rychlost deformace [s^{-1}].

B je pevnostní parametr [-],

C je parametr citlivosti na rychlost deformace [-],

m je teplotní koeficient odpevnění [-],

n je exponent zpevnění [-],

T je teplota materiálu [K],

T_0 je referenční teplota při statické mezi kluzu $\sigma = \sigma_0$ [K],

σ_0 je mez kluzu stanovená z kompresních testů [MPa],

Pokud byl vypočten či jinak zjištěn deformační odpor, je možné získat sílu pro přechování. Vypočte se vztahem (2.16).

$$F_{p\acute{e}ch} = -\sigma_{z, stř} = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h}\right) \cdot S \quad [\text{kN}] \quad (2.16)$$

Aby byl zvolen správný tvářecí stroj je nutné znát přetvárnou práci “A“. Její výpočet vychází ze znalosti deformačního odporu, viz vztah (2.17), případně je možné použít výpočet pomocí síly a vykonané dráhy (2.18).

V tabulce 4 jsou uvedeny vstupní parametry potřebné k výpočtu přetvárného odporu rovnicí dle Johnson-Cooka

Tab. 4 Parametry konstruktivní Johnson-Cookovy rovnice pro ocel 11 320 5R [4]

	jednotky	hodnoty
σ_0	[MPa]	450
B	[-]	350
C	[-]	0,055
n	[-]	0,18
m	[-]	0,7
T	[K]	296
T_0	[K]	293
T_m	[K]	1773

2.3.2 Dopředné duté protlačování

Pokud je součást protlačována dopředně, viz obrátek 22, je deformační odpor znovu možné určit s využitím metody rovinných řezů. Průtlačnici je potřeba rozdělit na tři části, prvním je kontejner, druhou kuželová část a třetím kalobrační očko. Výpočty jsou provedeny pro jednotlivé části separovaně.

Ke zjištění deformačního odporu je možné také využít jednoduššího alternativního vztahy dle Feldmana (2.19).

$$\sigma_d = \sigma_{ps2} \cdot \varphi \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\varphi} + 2 \frac{f}{\alpha} \right) + \pi \cdot D_1 \cdot L_1 \frac{f}{S_1} \sigma_{p1} \quad [\text{MPa}] \quad (2.19)$$

kde: σ_{ps2} je střední hodnota přirozeného přetvárného odporu [MPa],

σ_{p1} je přirozený přetvárný odpor v zásobníku [MPa],

f je součinitele tření [-],

α je vrcholový úhel kužele [rad],

D_1 je průměr protlačku [mm],

L_1 je výška zásobníku [mm],

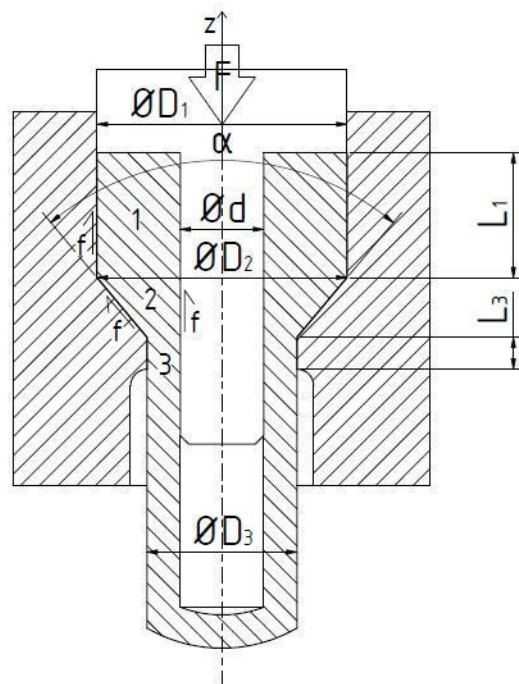
L_3 je výška oka [mm].

φ je logaritmické přetvoření a vypočte se vztahem (2.20)

$$\varphi = \ln \frac{D_1^2 - d^2}{D_3^2 - d^2} \quad [-] \quad (2.20)$$

kde: D_3 jevnější průměr protlačené součásti [mm],

d je vnitřní průměr protlačené součásti [mm].



Obr. 22 Zpětné duté protlačování [1]

Síla nutná k protlačení součásti je spočítána dle vztahu (2.21).

$$F_{protl} = \sigma_d \cdot S \quad [\text{kN}] \quad (2.21)$$

2.3.3 Zpětné protlačování

Při výpočtech deformačního odporu pro zpětné protlačování je možné použít výpočtový vztah dle Dippera (2.22). Děj je považován za dvojí proces přechování. K prvnímu dojde pod průtlačníkem v 1. oblasti a ke druhému v pomyslném prstenci, s označením 2. Jednotlivé oblasti jsou znázorněny na obrázku 23. Výpočet je opět odvozen z rovnováhy sil na rotačtě symetrickém tenkém elementu. Jsou obdrženy diferenciální rovnice rovnováhy, které jsou řešeny obdobně jako u vztahu dle Siebela. Vyřešením je získána rovnice výpočtu deformačního odporu. Stejně jako u přechování jsou pro tento proces zavedeny předpoklady řešení:

- velikost poměrného přetvoření

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S_0} = \frac{d^2}{D_0^2} \geq 0,5 \div 0,6 \quad ,$$

- hodnota součinitele plastického tření kovu mezi oblastmi 1 a 2 je $f = 0,5$,
- tření, materiálu na styku s čelem průtláčnicku a průtláčnicku odpovídá kluznému tření dle Coulombova vztahu
- středná součinitel tření $f_{2stř} = 0,5(f_1 + 0,5)$.
- pro výpočet dle modelu (Obr.22) Dipper stanovuje logarimické přetvoření:

$$\varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_1 \left(1 + \frac{d}{8 \cdot s} \right) \quad (2.22)$$

$$\varphi_1 = \varphi_3 - \varphi_1 \quad (2.23)$$

$$\varphi_1 = \ln \frac{h_0}{b} \quad (2.24)$$

Deformační odpor se spočítá dle vzorce

(2.25):

$$\sigma_d = -\sigma_{z1stř} = -\frac{1}{S} \int_S \sigma_{z1} \cdot ds = \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot 1 \cdot d}{h} \right) + \sigma_{p2stř} \cdot \left(1 + \frac{2f_{2stř}}{D-d} \cdot b \right) \quad [\text{MPa}] \quad (2.25)$$

kde: D je vnější průměr součásti [mm],

d je vnitřní průměr součásti [mm].

Dálší způsobem výpočtu deormačního odporu je užití vztahu dle Siebela (2.26), používaný při protlačování ocelových a mosazných kalíšků s tloušťkou stěny větší než desetina průměru průtláčku.

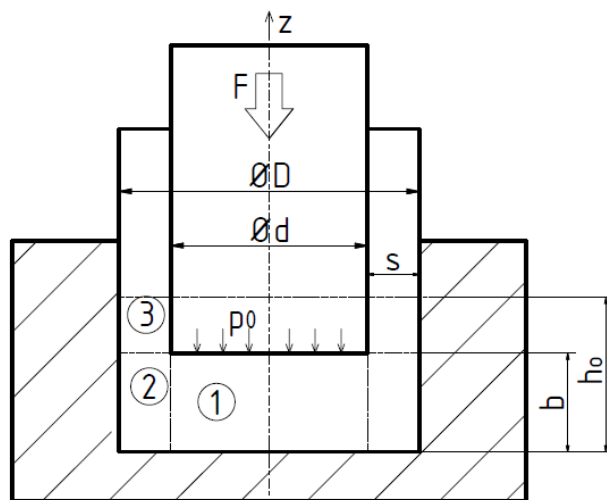
$$\sigma_d = 1,152 \cdot \sigma_p \cdot \frac{D^2}{d^2} \cdot \left(\log \frac{D^2}{D^2 - d^2} + \frac{d^2}{D^2 - d^2} \cdot \log \frac{D^2}{d^2} + \log \frac{d^2}{D^2 - d^2} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (2.12)$$

2.4 Nástroje a nástrojové materiály [1] [16] [24]

Důležitým prvkem při výrobě je použitý nástroj, jeho konstrukce a výrobní materiál. Při objemovém tváření má častokrát nástroj tvar, který je určen tvarem vyráběné součásti, jedná se tedy o jednoúčelový nástroj. Nejčastěji jsou nástroje pro objemové tváření využívány pro sériovou a hromadnou výrobu. Cena nástroje je důležitá pro hospodárnost výroby, k jejímu zajištění je podstatné, aby nástroj byl spolehlivý, jednoduchý, snadno vyměnitelný a s dobrou životností.

K zajištění maximální životnosti nástroje je třeba, aby rychlost opotřebení nástroje byla minimální. Degradace nástroje závisí na několika faktorech. Nejdůležitějšími jsou konstrukce nástroje, jeho materiál, tepelné zpracování, zvolený tvářecí proces, tvářený materiál a mazání polotovaru.

Při navrhování nástroje je nutno dbát na vysoké tlaky a veliké namáhání, kterému je nástroj vystaven. Nástroje pro pěchování jsou namáhány tlakem, kdežto nástroje protlačovací podléhají střídavě tlaku i tahu. Namáhání nástroje může být i tepelné, pokud jsou tvářené díly předehřívány.



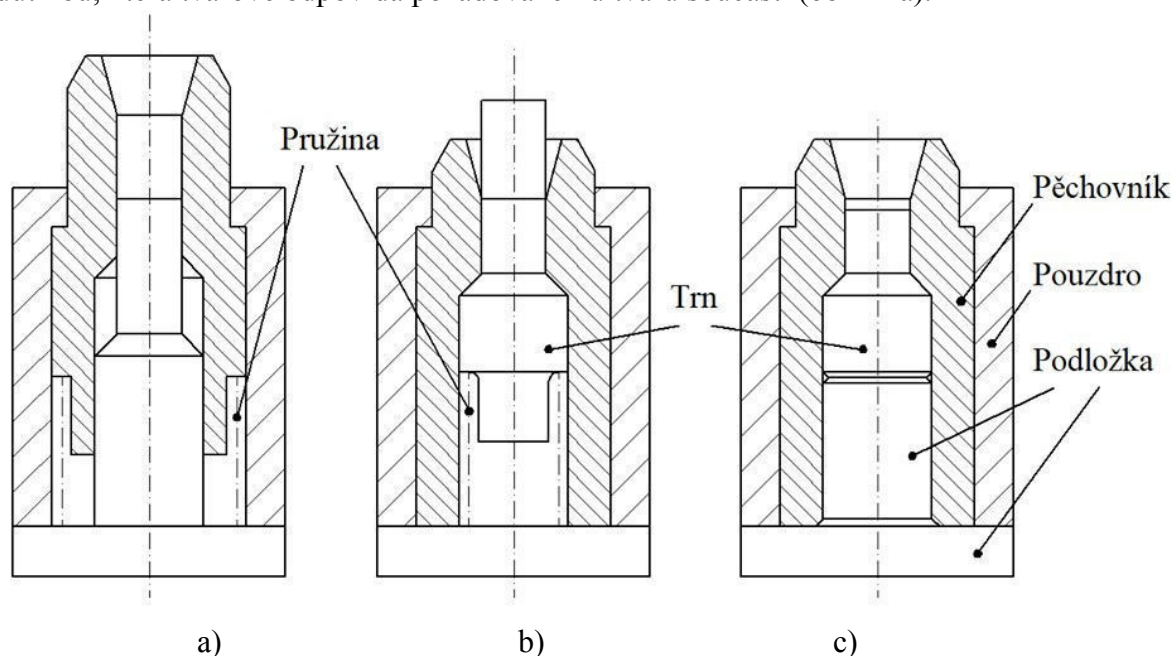
Obr. 23 Zpětné protlačování [1]

Nástroj tedy musí být tuhý, aby nedocházelo k pružení, které ovlivňuje životnost nástroje a rozměrovou přesnost výrobku. Vedení nástroje musí být dobré, aby byla zajištěna souosost průtlačníku s dutinou v průtlačnici. K ochraně funkčních částí slouží spolehlivý vyhazovací a stírací systém.

2.4.1 Pěchovací nástroje [1]

Pěchovací nástroje jsou především používány ke kalibraci, předpěchování, či napěchování požadovaného tvaru polotovaru před samotnou výrobou. Nástroje jsou konstruovány pro jednooperační i pro víceoperační stroje.

Tvar pěchovníku odpovídá pěchované součásti, kdy pěchovníky s rovným čelem (obr. 24 b) slouží ke kalibraci čel polotovaru. Pěchovníky se zahlužením jsou využity pro správné středění (obr. 24 c). K předpěchování jsou používány pěchovníky s funkční dutinou, která tvarově odpovídá požadovanému tvaru součásti (obr. 24 a).



Obr. 24 Konstrukční provedení pěchovníků [1]

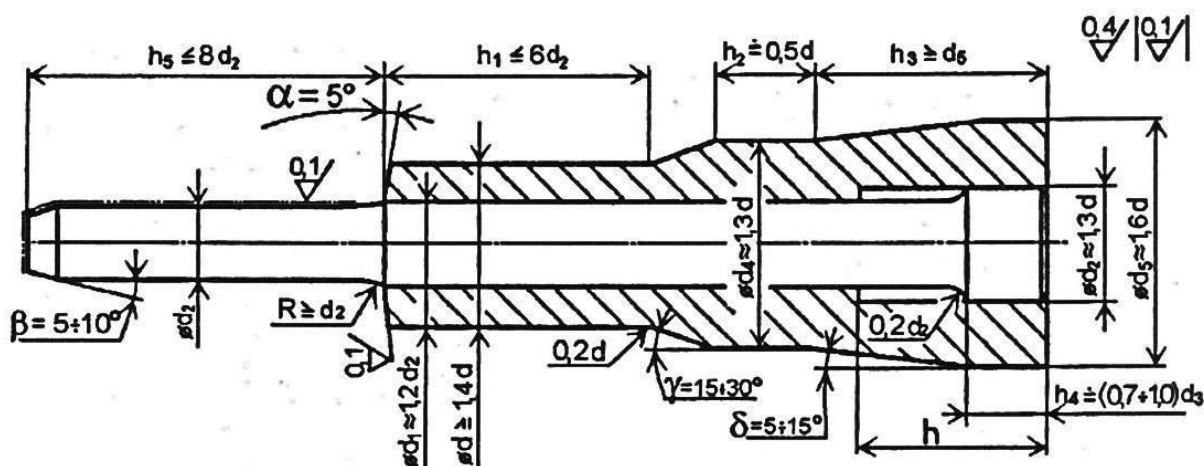
Konstrukční provedení pěchovníků jsou různé. Mohou být konstruovány s pevným pěchovníkem (obr. 25 c) jehož konstrukce je jednoduchá a využívá se pro krátké součásti. Složitější konstrukci mají pěchovníky s odpruženým trnem (obr. 25 b) a s odpruženým pěchovníkem (obr. 25 a). Konstrukce s odpruženým trnem pomáhá při zavedení ústřížku do pěchovnice. Odpruženého pěchovníku je využito při pěchování dlouhých dřívů.

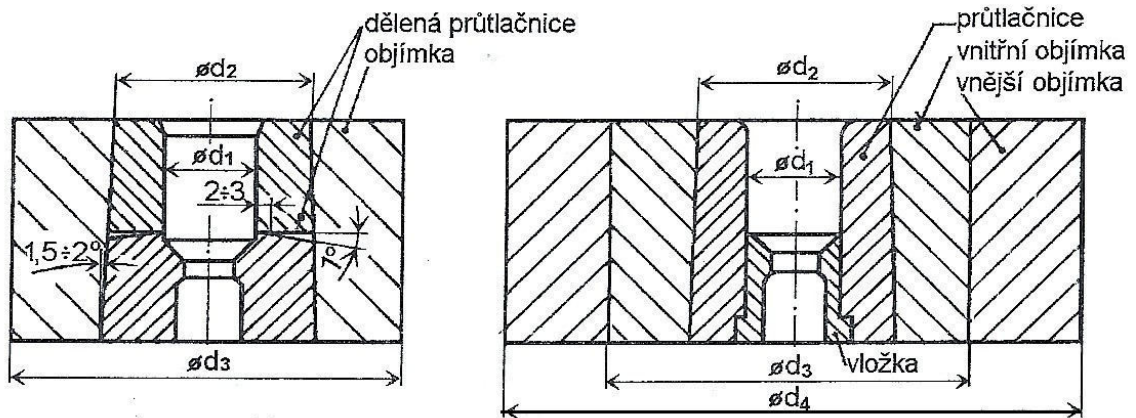
2.4.2 Protlačovací nástroje [1]

Dopředné protlačování je využíváno pro redukci průřezu dutých součástí a polotovarů. Mohou být tvářeny i duté profily. Při dopředném protlačování lze dosáhnout velkého prodloužení součásti v poměru k jeho průměru až 24:1, přičemž výsledná délka protlačku není závislá na délce průtlačníku. Průtlačnice s redukční částí tvaru kužele je nejpoužívanější konstrukcí. Právě tvar redukční části je nejdůležitějším parametrem pro dopředné protlačování. Úhel redukční části je důležité vhodně zvolit, jelikož má velký vliv na deformační odpor.

Technical drawing of a mechanical part (Fig. 1.10) showing two views: a front view and a side view. The front view shows a shaft with a diameter of $1.3d$, a length of h_1 , and a fillet radius R_2 . The side view shows a shaft with a diameter of $1.6d$, a length of h_2 , and a fillet radius R_2 . The drawing includes various dimension lines and labels such as h_1 , h_2 , d_1 , d_2 , R_2 , and h .

Průtlačníky pro protlačování dutých těles jsou náchylné k porušení v místě, kde se vyskytuje přechod z malého průměru. Vhodnější konstrukcí tedy je dělený průtlačník s upínacím pouzdrem. Konstrukce takového nástroje je zobrazena na obrázku 26.





a) příčně dělená s jednou objímkou

b) s vložkou a dvěma objímkami

Obr. 27 Příklady zapouzdřených průtlačnic pro dopředné protlačování [1]

Tab. 5 Doporučené parametry pro průtlačnici. [1]

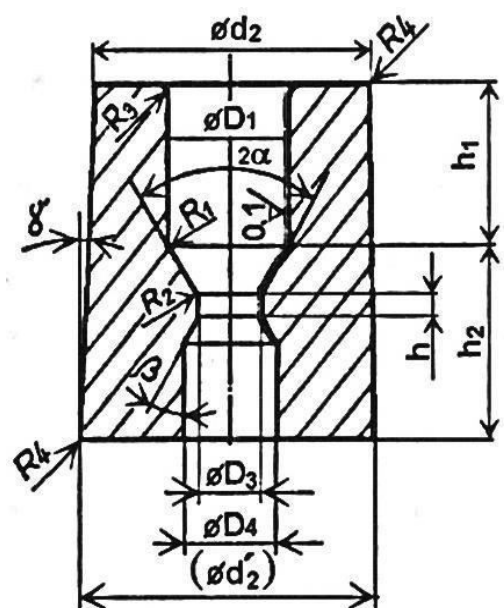
Teplota tváření [°C]	20 °C
D₄ [mm]	$D_3 + (0,1 \div 0,25)$
H [mm]	$0,5 \cdot \sqrt{D_3}$
2α [°]	$30^\circ \div 90^\circ$
R₁ [mm]	$(D_1 - D_3)/2$
R₂ [mm]	$(0,05 \div 0,1) \cdot D_3$
R₃ [mm]	asi $0,15 \cdot D_1$
H₂ [mm]	min $0,7 \cdot D_1$
γ [°]	$1^\circ \div 3^\circ$
B [°]	$5^\circ \div 10^\circ$

Ke zlepšení zavádění polotovaru do průtlačnice, je konstruována se zásobníkem a zaváděcím rádiusem.

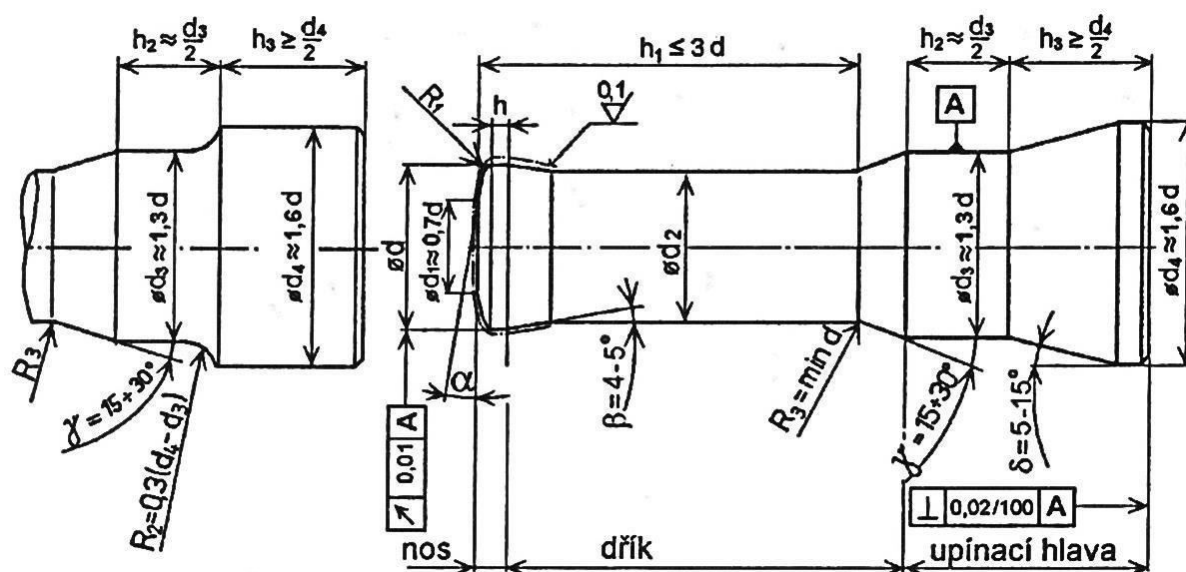
Vliv vrubu lze také snížit příčným rozdělením průtlačnice v místě přechodu válcové části do kuželové, příklad takové průtlačnice je na obrázku 27 a). Při zapouzdření může být použita vložka s přesahem, což nám umožní snadnější výměnu po opotřebení, příklad je zobrazen na obrázku 27 b).

Pokud dojde k vyššímu přetvoření než 30% délka zásobníku musí být větší než výška špalíku, aby se docílilo vedení špalíku po celé délce.

Nástroje pro zpětné protlačování jsou konstruovány především pro zhotovování součástí tvaru kalíšku. Za čelní fazetkou jsou průtlačníky odlehčeny, aby nedocházelo ke tření mezi průtlačníkem a stěnou kalíšku. Při zpětném protlačování je nejvíce namáhán průtlačník, oproti dopřednému protlačování, kde nejvíce namáhanou byla průtlačnice. Jsou namáhány jednak tkakem při protlačování a také tahem při stírání průtlačku.



Obr. 28 Konstrukce průtlačnice pro dopředné protlačování [1]



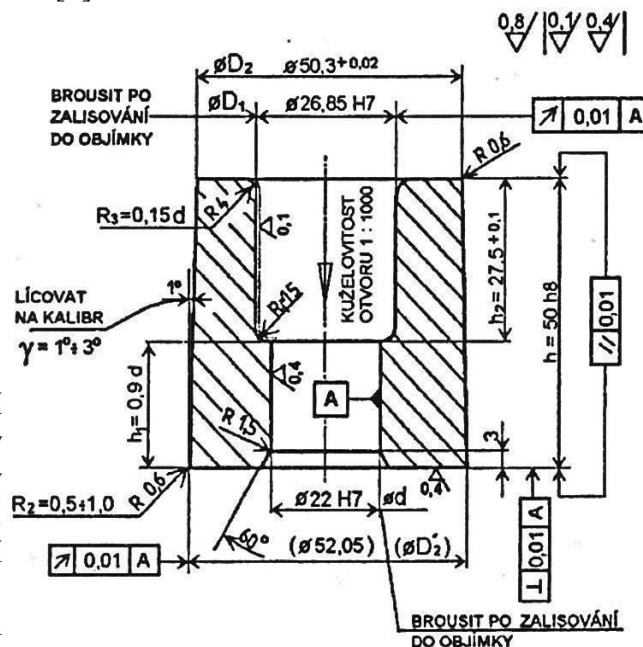
Obr. 29 Konstrukce průtlačníku pro zpětné protlačování [1]

Velikost a průběh protlačovací síly je závislá především na tvaru čela průtlačníku. Čelo bývá většinou mírně kuželovité a úhel α je volen vzhledem k tvaru průtlačku a tvářecí teplotě. Nejvíce osvědčený a doporučený tvar průtlačníku je znázorněn na obrázku 29. Požadovaná malá drsnost aktivní části nástroje (nosu) může zvýšit životnost nástroje.

Tab. 6 Doporučené rozměry pro průtlačník. [1]

Teplota tváření	20°C
d [mm]	$d-(0,1 \div 0,2)$
h [mm]	$0,5 \cdot \sqrt{d}$
α [°]	$5^\circ \div 8^\circ$
R₁ [mm]	$(0,05 \div 0,1)d$
R₃ [mm]	$d-(2 \cdot R_1 + 0,2) \approx 0,7d$

Průtlačnice pro zpětné protlačování také bývají zalisovány do objímky pro zvýšení únosnosti. Tvar dutiny průtlačnice je určen tvarem součásti. Zaoblení ústí dutiny usnadní zavádění polotovaru a sníží se koncentrace napětí. Pokud je ústí konstruováno s kuželovým náběhem, usnadní se vyhlazování průtlačku. Broušením a lapováním funkčního povrchu se dosahuje požadované malé drsnosti.



Obr. 30 Konstrukce průtlačnice pro zpětné protlačování [1]

2.4.3 Nástrojový materiál [21] [22] [25]

Pro tvářecí nástroj je nutná volba vhodného materiálu, ten musí nástroji poskytovat dobrou životnost a stálost rozměrů. Materiál tedy musí být tvrdý, pevný, s dostatečnou houževnatostí a odolný vůči opotřebení. Volbu materiálu určuje také konstrukční provedení nástroje, technologický proces výroby a tvářený materiál, avšak při výrobě nástroje je vhodná dobrá obrobitelnost.

U nástrojových ocelí je rozhodujícím faktorem jejich jakost. Důležitý je nízký obsah nežádoucích prvků jako je síra a fosfor, dále musejí být dezoxidované. Struktura nástrojových materiálů je v základu martenzitická. Legováním oceli vhodnými prvky jako jsou chrom (Cr), nikl (Ni), molibden (Mo), wolfram (W), vanad (V), je část uhlíku v oceli navázána ve formě karbidů. Následným tepelným zpracováním je dosaženo lepšího rozmístění karbidů.

Materiály pro nástroje jsou především kaleny a popouštěny, aby získaly dostatečnou tvrdost a houževnatost. Před kalením je však upravována struktura vyžiháním. Normalizačním žiháním se docílí vyrovnání rozdílů vzniklých během kování, může dojít i ke zjemnění zrna. Těžko obrobitelné oceli jsou následně žihány na měkko ke změně lamelárního perlitu na zrnitý. Vhodné je i zařazení žihání ke snížení vnitřního pnutí. Následně je materiál martenziticky kalen, kdy oceli s nízkým obsahem legujících prvků musí být rychle ochlazeny. Oceli obsahující těžko rozpustné karbidy je nutné ponechat na kalicí teplotě delší dobu. Pro nízké kalicí teploty je volena nižší teplota kalení, která závisí na chemickém složení oceli. Pokud je kaleno při nízké teplotě vznikne hrubozrná martenzitická struktura s jehlicovým martenzitem.

Získaný materiál s martenzitickou strukturou má velkou tvrdost, avšak nachází se v něm velké vnitřní pnutí. Ke snížení nežádoucího pnutí je do procesu zařazeno popouštění, které zvýší houževnatost materiálu. Přeměny nestabilního tetragonálního martenzitu a zbytkového austenitu na stabilní kubický martenzit je dosaženo dlouhotrvajícím popouštěním na teplotě 100 až 200°C.

Tab. 7 Materiály pro protlačovací nástroje [25].

Část nástroje	Označení materiálu dle ČSN	Tvrdost HRC
Průtlačník	19 221, 19 432, 19 436, 19 437, 19 733, 19 800, 19 824	HRC = 61 ÷ 64
Průtlačnice	19 191, 19 436, 19 437, 19 614, 19 655, 19 732, 19 733	HRC = 58 ÷ 64
Objímka	13 180, 14 160, 14 250, 19 452, 19 650, 19 740	HRC = 45 ÷ 52
Vyhazovač	19 436, 19 452, 19 732, 19 733	HRC = 55 ÷ 62
Kolík vyhazovače	19 191, 19 312, 19 423, 19 452, 19 733	HRC = 55 ÷ 62
Opěrná deska a podložka, vodící vložka	19 191, 19 312, 19 356, 19 733	HRC = 55 ÷ 62
Těleso protlačovadla	11 600, 11 700, 12 060, 13 180, 14 260	HRC = 40 ÷ 45

Pro nástroje jsou voleny oceli z řady nástrojových ocelí, příklady používaných ocelí pro protlačovací nástroje jsou uvedeny v tabulce 7. Pokud jsou nástroje hodně namáhány, jsou

v některých případech pro výrobu použity slinuté karbidy. Nejlepší vlastnosti mají slinuté karbidy wolframu a kobaltu. Ty poskytují větší tvrdost, lepší pevnost v tlaku a odolnost vůči opotřebení. Největším přínosem však je navýšení trvanlivosti, oproti nástrojům z oceli, až stonásobně. Nevýhodou je snížená pevnost v ohybu a vyšší pořizovací cena. Příklady používaných karbidů jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8 Slinuté karbidy používané pro protlačování. [1]

Označení		Složení [%]		Tvrdost HRB	Pevnost v ohybu [MPa]
Výrobce	Číselné	W	Co		
G1	18 518	94	6	88	1200
G1.1	18519	92	8	87,5	1300
G2	18520	89	11	86,5	1400
G3	18 523	85	15	85	1600
G4	18 524	80	20	84	1800
G5	18 525	75	25	82,5	1950
G6	18 526	70	30	80	2150

2.5 Materiály pro objemové tváření [2] [4] [7] [19] [26]

Pro objemové tváření jsou nejvhodnější oceli, které mají požadované vlastnosti. Tyto materiály musí být schopny velkého přetvoření. Pokud ve struktuře materiálu krystaly dovolují pohyb atomů v určitých směrech (kluzných), aniž by došlo k porušení soudržnosti jednotlivých vrstev, jedná se o materiály dobře tvárné.

Požadovanými vlastnostmi materiálu, především oceli, tedy jsou:

- a) **struktura** – ocel by měla být co nejměkčí. Nejvhodnější strukturou je feriticko-perlitická se zcela globulárním perlitem. Užitím normalizačního žíhání a následně žíhání na měkko, tzv. kombinovaným žíháním, se také dá dosáhnout vhodné struktury. Zrna se z rovnoměrní a sníží se tvrdost.
- b) **mechanické vlastnosti** – materiál by měl mít pokud možno co nejnižší mez kluzu, dostatečnou tvárnost a malý sklon ke zpevnění. Dále je důležitá vysoká tažnost a kontrakce. Nejčastěji používané jsou nízkouhlíkové a nízkolegované oceli, které snadno zaplňují tvar nástroje. Také není nutné je složitě tepelně upravovat.
- c) **chemické složení** – některé prvky výrazně ovlivňují tvárnost materiálu. Mezi nejvýznamnější patří uhlík, kdy s jeho rostoucím procentuálním zastoupením se zároveň zvyšují i mez kluzu, mez pevnosti i tvrdost. Křemík je dalším nežádoucím prvkem, jehož vliv se projevuje podobně jako uhlík, a jeho obsah je ovlivněn přítomností nežádoucích nekovových vměstků. Síra rovněž patří k prvkům, které v ocelích nechceme, jelikož snižuje houževnatost. Slučuje se také se železem na téměř nerozpustný sírník železnatý (FeS). Prvkem způsobujícím zvýšenou křehkost materiálu je fosfor, jenž také ovlivňuje zpevnění materiálu. Při nižších teplotách se jeho atomy pohybují pomaleji, čímž blokují pohyb dislokací. Dusík způsobující stárnutí oceli je také velmi nežádoucím prvkem v oceli.

Tab. 9 Základní druhy ocelí používané k objemovému tváření. [1]

Oceli podle ČSN		Chemické složení									Pevnosti ve vyžádaném stavu [MPa]	
		C	Mn	Si	Cr	V	Ni	Cu	P	S		P - S
A	a 11 341	0,10							0,05	0,05		34 až 42
	11 426	0,15							0,05	0,05		42 až 50
	a 11 523	0,20	1,50	5,55					0,05	0,05		52 až 64
B	12 013	0,07	0,30	stopy					0,03	0,03	0,05	40
	12 010	0,13	0,60	0,35					0,04	0,04	0,07	34
	10 020	0,20	0,90	0,35					0,04	0,04	0,07	40
	12 024	0,25	0,65	0,37	0,30		0,30		0,05	0,05	0,09	40
	12 031	0,35	0,80	0,37	0,30		0,30		0,045	0,045		40
	a 12 040	0,40	0,80	0,35					0,04	0,04	0,07	45 až 60
	a 12 050	0,50	0,80	0,35					0,04	0,04	0,07	55
C	a 13 240	0,40	1,40	1,40					0,04	0,04	0,07	75
	14 120	0,18	0,60	0,35	0,90				0,04	0,04	0,07	60
	14 220	0,19	1,40	0,35	1,10				0,04	0,04	0,07	70
	14 221	0,22	1,30	0,35	1,30				0,04	0,04	0,07	70
	a 14 331	0,35	1,10	1,20	1,10		0,40	0,25	0,035	0,035		80
	a 15 230	0,34	0,80	0,40	2,50	0,20			0,04	0,04	0,07	70
	15 260	0,55	1,00	0,40	1,20	0,20			0,04	0,04	0,07	80
	16 220	0,19	1,00	0,25	1,20	0,15	1,60		0,04	0,04	0,07	80

Vhodný materiál tedy musí být dobře tvařitelný, s nízkou mezí kluzu, houževnatý, málo zpevňující, s nízkým obsahem uhlíku a ideálně s co nejplošší deformační křivkou. Pro objemové tváření tvarově jednodušších dílů mohou být použity i oceli se středním obsahem uhlíku, či legované.

V tabulce 9 jsou uvedeny základní druhy ocelí, které jsou používány pro součásti zhotovené objemovým tvářením. Je v ní také uvedeno maximální přípustné množství jednotlivých prvků. Oceli A jsou oceli běžné výroby, oceli B jsou uhlíkové ušlechtilé oceli a oceli C jsou ušlechtilé nízkolegované oceli. Oceli označené a jsou oceli vhodné pro přechování.

Mimo oceli jsou hojně využívány pro objemové tváření i neželezné kovy a jejich slitiny. Neželezné kovy při tváření mohou dosáhnout vysokého stupně deformace, proto výrobky z nich mohou být zhotoveny pouze v jedné operaci. Mezi nejtvárnější kovy patří hliník, cín, měď a jejich slitiny.

2.6 Technologičnost [1] [20] [22] [27]

Tvářením lze vyrábět součásti rozličných tvarů, ať jsou to plné součásti, duté se dna i bez dna. Mohou být tvrově sipetrické i asimetrické, avšak né všechny tvarově složité součásti jsou vyrobitelné konvenčními metodami. Technologičnost představuje možnost vyrobitelnosti přidosazení co možná nejmenších výrobních nákladů v nejkratších době. Nejstnáze vyrobitelnými jsou součásti symetrických tvarů. V závislosti na charakteristickém tvaru jsou součásti rozděleny do několika skupin.

a) Součásti čepového tvaru (obrázek 31) – typickou metodou jejich výroby je pčhování, mohou být zhotoveny i dopředným, stranovým či zpětným protlačením.



Obr. 31 Součásti čepového tvaru [2]

b) Součásti kališkového tvaru (obrázek 32) – nejvhodnější technologií jejich výroby je dopředné a zpětné protlačování.



Obr. 32 Součásti kališkovitého tvaru [2]

c) Nízké rotační symetrické součásti s otvorem (obrázek 33) – Možnost jejich výroby představuje dopřednéprotlačení dutého polotovaru, avšak s ohledem na tvar jsou voleny a kombinovány další metody.



Obr. 33 Součásti rotační, symetrické s otvorem [2]

d) Součásti nesymetrických tvarů (obrázek 34) – jejich výroba je značně náročná, proto nejsou široce vyráběny, jedná se spíše o kusovou výrobu.



Obr. 34 součásti nesymetrické [2]

2.7 Stroje pro tváření [1] [25] [18] [27] [29]

Tvářecí stroj je volen na základě vypočtené hodnoty tvářecí síly a přetvárné práce. Maximální hodnota tvářecí síly nesmí být větší než jmenovitá síla stroje, pokud by ji překročila došlo by k jeho přetížení. Pro objemové tváření jsou používány lisy, mechanické a hydraulické, nebo speciální automatické tvářecí stroje.

Mechanické lisy jsou používány při malosériové výrobě velkých výlisků, vyráběné jednou nebo dvěma operacemi, případně pro výlisky vyžadující mezioperačním žíháním. Hlavní výhodou je jejich tuhost zajišťující kvalitu přesnosti výrobků, účinnost a životnost nástroje.

Rozdělení mechanických lisů:

- Klikové lisy – poskytují velký zdvih, vhodné pro protlačování
- Kolenové lisy – mají poměrně malý zdvih a poskytují malou tvářecí práci, používají se jen pro některé případy výroby, pro které je vhodná jejich charakteristická špička tvářecí síly na konci zdvihu.

c) Výstředníkové lisy – nejsou vhodné pro objemové tváření, vyznačují se malou tuhostí a používají se jen pro přípravné práce

Dalším používaným typem jsou hydraulické lisy, které jsou vhodné pro výrobu rozměrných, především dlouhých výlisků. Je to díky jejich schopnosti vyvinout vysokou tvářecí sílu na dlouhé pracovní dráze, přičemž tvářecí sílu lze využít téměř po celé dráze zdvihu. Rychlost pohybu beranu je snadno regulovatelná. Hydraulické lisy umožňují tvářet konstantním tlakem a rychlostí beranu. Nevýhodami těchto lisů jsou složitější konstrukce pohonu, pomalejší chod beranu, nižší účinnost a větší pořizovací cena.

Speciální automatické stroje představují pēchovací automaty, protlačovací automaty a v současné době nejpoužívanější postupové lisy. V těchto lisech je součást tvářena v několika krocích v postupových nástrojích. Přenos polotovaru je zajištěn přenášecím zařízením (kleštinami). Výchozí polotovar je většinou v podobě svitků drátu, z nichž si pomocí stříhacího stroj sám stříhá polotovary. Příkladem může být tvářecí automat od společnosti Harbin Rainbow Technology CO.,Ltd., který dovoluje instalaci šestioperačního nástroje.



Obr. 35 Šestioperační tvářecí automat Harbin Rainbow Technology CO.,Ltd. [29]

3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY

Při návrhu nejvhodnější technologie pro výrobu zadané součásti je nezbytné vycházet z technologických výpočtů. Jako nejvýhodnější variantu je nejčastěji volena metoda, při níž budou hodnoty přetvoření na hlavě matice a na dříku co nejvíce podobné. Je potřeba dbát i na složitost nástrojů potřebných pro jednotlivé operace.

Technologické výpočty budou použity pro určení potřebné tvářecí síly a práce v jednotlivých operacích. Volba tvářecího stroje poté vychází z velikostí vypočtených sil a prací.

Výpočty pro technologie objemového tváření vychází ze zákona zachování objemu v jednotlivých operacích, jelikož nedochází k odebírání materiálu. Objem výsledného produktu je tedy nutné znát. Z něj je možné poté určit váhu a vhodné rozměry polotovaru. Hmotnost součásti lze zjistit výpočtem, kdy je rozdělena na jednotlivé menší celky, jako jsou kvádry, válce, kužele apod., u nichž je snadné pomocí vzorců objem vypočíst. Alternativní a v současné době používanější metodou je vytvoření modelu součásti v programu např. Inventoru Professional 2019, který byl použit pro modelování a určení obsahu zadaného čepu. Objem získaný programem byl určen pro součást z ocele s hustotou $\rho = 7,85 \text{ g/cm}^3$ a jeho hodnota je $V = 2162,92 \text{ mm}^3$. Hmotnost součásti, taktéž určena programem Inventor, je $m = 17\text{g}$.

3.1 Varianty technologického postupu výroby [1]

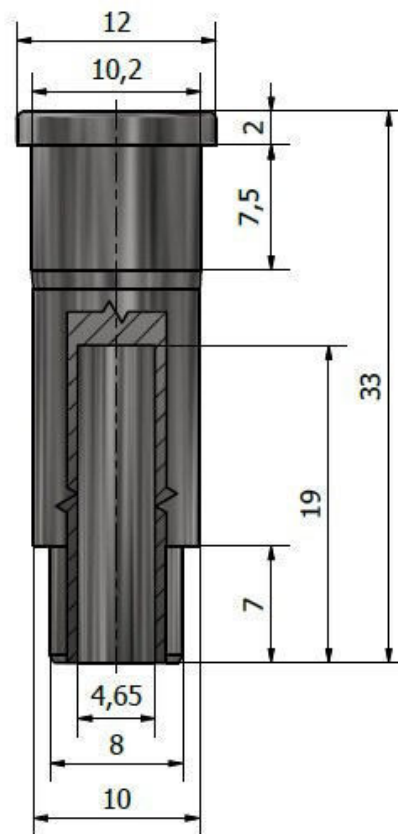
Při volbě nejvhodnější varianty výroby je potřeba zhodnotit několik parametrů. Prvním je objem polotovaru, z něj je odvozen další parametr, kterým je zvolený polotovar. Důležitým parametrem je požadavek na co možná nejrovnoměrnější rozložení zpevnění napříč součástí. Maximální povolené přetvoření, jehož hodnoty jsou $\phi = (0 \div 1,29)$, nesmí být překročeno. Materiál polotovaru je již předem zvolená ocel 11 320 5R.

Rozměry polotovaru jsou zvoleny s ohledem na dostupnost tyčového a drátového materiálu. Zvažovány jsou polotovary tří průměrů: 8 mm, 9 mm a 10 mm.

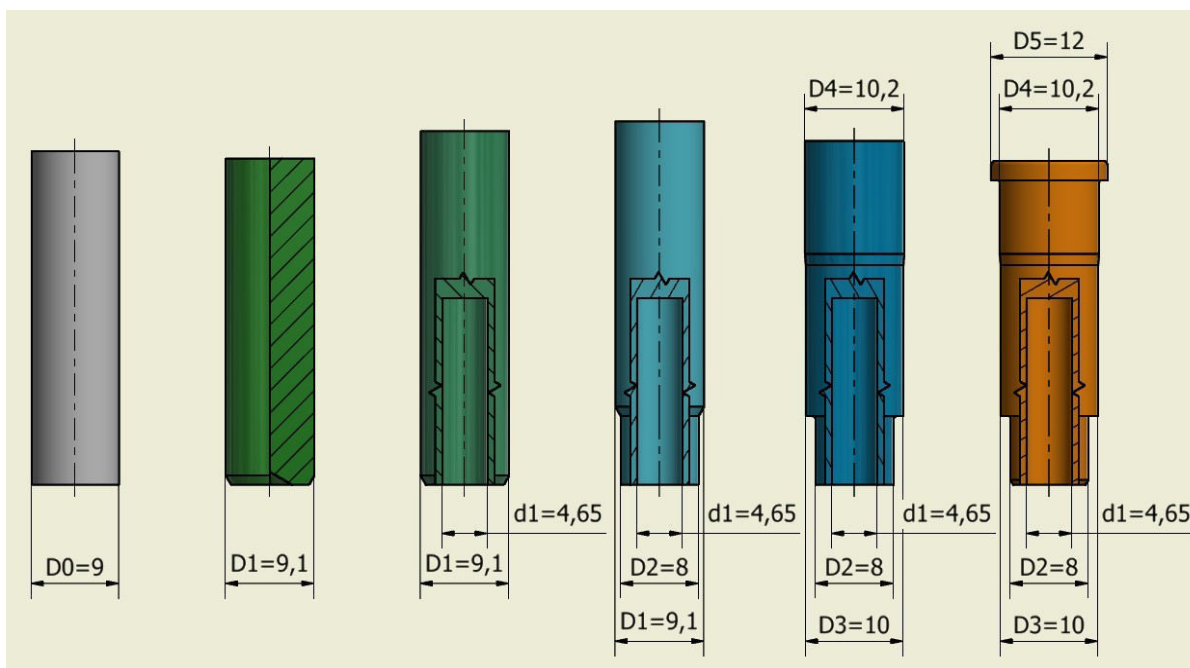
Pro všechny zvažované varianty budou stanoveny hodnoty přetvoření, tyto hodnoty nesmí překročit mezní hodnoty přetvoření z tabulky 3. Pokud budou hodnoty vyšší bude nutné do procesu výroby zařadit mezioperační žihání.

a) Varianta 1 – byl zvolen polotovar v podobě špalíku ustřiženého z drátu o průměru 10 mm.

Ke zjištění rozložení napětí v součásti byl použit výpočet logaritmického přetvoření podle vztahu (2.4). Schéma technologického postupu výroby je uvedeno na obrázku 37. Pro tuto metodu je předpokládáno rovnoměrné rozložení, jelikož průměr polotovaru byl zvolen na základě výpočtu optimálního průměru, viz Příloha 3. Výpočty jsou uvedeny pro jednotlivé operace:



Obr. 36 Základní rozměry součásti



Obr. 37 Schéma tvařecích operací při výrobě pro variantu 1

- V 1. operaci je součást spěchována z $D_0 = 9 \text{ mm}$ na $D_1 = 9,1 \text{ mm}$. Operací je vytvořeno zkosení hrany pod úlem 30° .

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{9,10^2}{9^2} = 0,0221$$

- Ve 2. operaci je zpětně protlačována díra o průměru $d_1 = 4,65 \text{ mm}$. V ní bude následně tvářen závit, proto ke stanovení optimálního průměru byl využit dokument společnosti Dormer tools, viz Příloha 5, kde jsou uvedeny hodnoty předvyrobených děr pro daný závit.

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_2^2 - d_1^2}{D_1^2} = \ln \frac{9,10^2 - 4,65^2}{9,10^2} = -0,3026$$

- 3. operací je vytvořen dřík₃ o vnějším průměru $D_2 = 8 \text{ mm}$.

$$\varphi_3 = \ln \frac{D_2^2 - d_1^2}{D_1^2 - d_1^2} = \ln \frac{8^2 - 4,65^2}{9,10^2 - 4,65^2} = -0,2755$$

- Při 4. operaci se pěchuje tělo čepu (dřík₁, dřík₂) a hlava. Dřík₂ je byl pro zjednodušení výpočtu rozdělen na dvě části – dřík₂₁ a dřík₂₂. Pěchuje se na dva průměry $D_3 = 10 \text{ mm}$ a $D_4 = 10,2 \text{ mm}$, mezi nimi je vytvořen přechod s vrcholovým úhlem $2\alpha = 10^\circ$.

1. přetvoření hlavy a dříku₁

$$\varphi_{4h} = \ln \frac{D_4^2}{D_2^2} = \ln \frac{10,20^2}{9,10^2} = 0,2282$$

2. přetvoření dříku₂₁

$$\varphi_{4d21} = \ln \frac{D_3^2}{D_2^2} = \ln \ln \frac{10^2 - 9,10^2}{9,1^2 - 4,65^2} = 0,1886$$

3. přetvoření dřívku₂₂

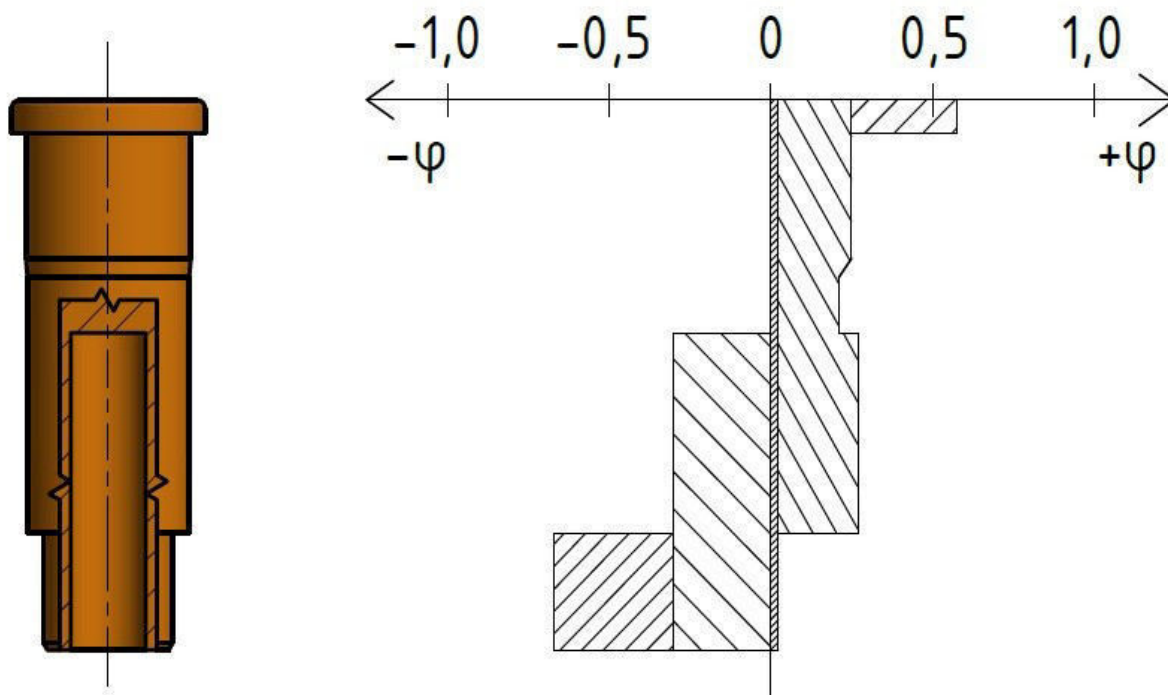
$$\varphi_{4d22} = \ln \frac{D_3^2 - d_1^2}{D_2^2 - d_1^2} = \ln \frac{10^2 - 4,65^2}{9,10^2 - 4,65^2} = 0,2476$$

- 5. operací je napěhována hlava o průměru $D_5 = 12$ mm a díl je zkalibrován.

$$\varphi_5 = \ln \frac{D_5^2}{D_4^2} = \ln \frac{12^2}{10,20^2} = 0,3250$$

V součásti vyráběné touto metodou bude dosaženo velmi rovnoměrného rozložení napětí v součásti, stanovený předpoklad rovnoměrnosti je splněn. Graficky je rozložení zobrazeno na obrázku 39. Během tváření nebude vyčerpána zásoba plasticity v žádné z operací. Rekrytalizační žíhání, případně jiná z metod obnovy plasticity, nebude muset být zařazena do výrobního procesu.

Analogickým postupem byli určeny hodnoty napětí při operacích varianty 2 a 3, viz příloha 3.

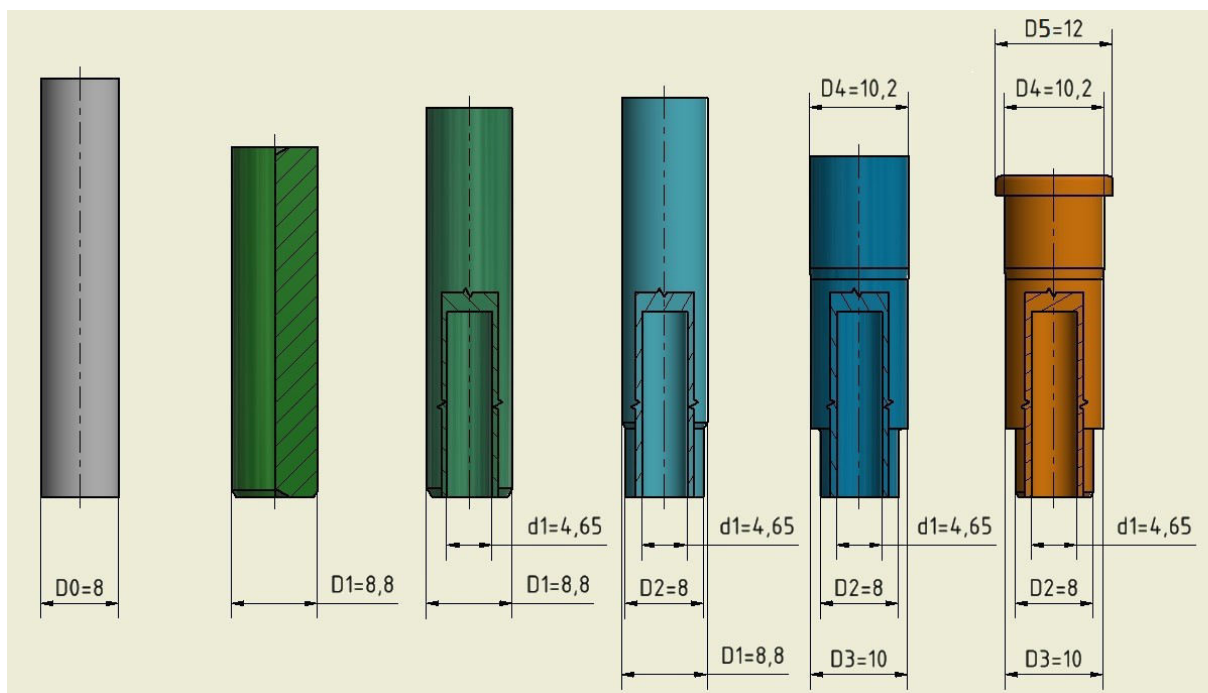


Obr. 38 Schéma přetvoření napříč součástí pro variantu 1

Celkové přetvoření lze spočítat součtem absolutních hodnot přetvoření ve všech operacích. Hodnoty celkových přetvoření jsou: $\varphi_h = 0,5754$, $\varphi_{d1} = 0,2503$, $\varphi_{d21} = 0,2107$, $\varphi_{d22} = 0,5723$, $\varphi_{d3} = 0,6920$.

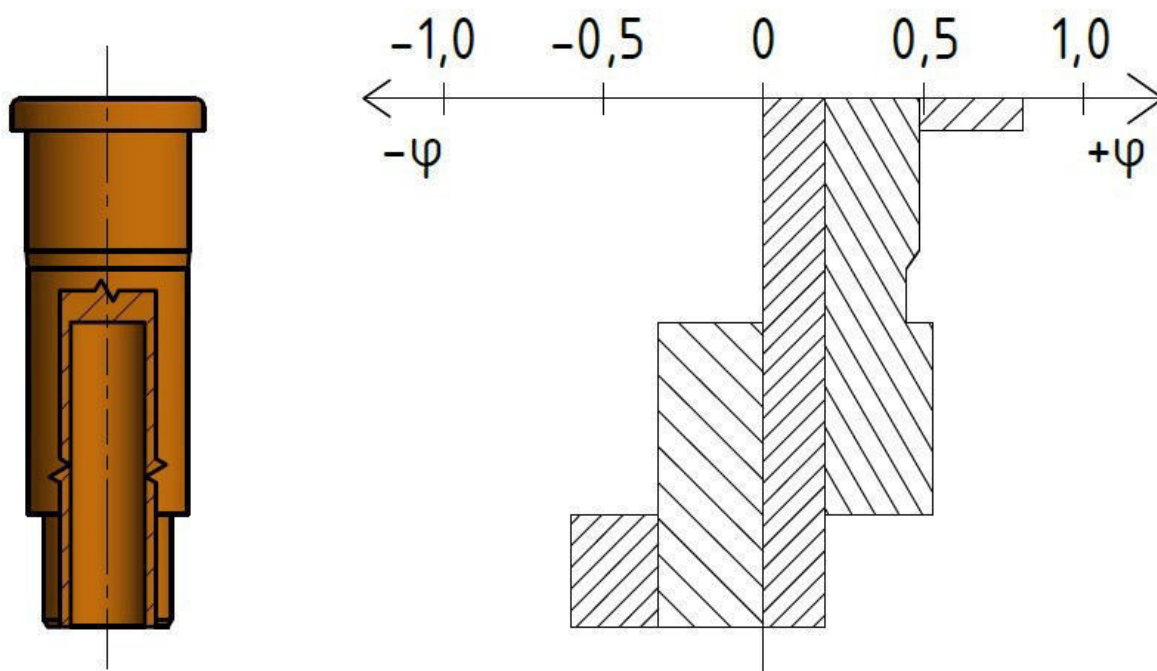
b) Varianta 2 – součást je zhotovena z polotovaru o průměru $D_0 = 8$ mm. Průběh operací je stejný jako u varianty 1. První je polotovar zpěchován, následuje protlačení díry, v další operaci je protlačen dřív₃ a v posledních dvou jsou zpěchovány dřívky 1 a 2 společně s hlavou.

Hodnoty vypočtených přetvoření jsou: $\varphi_1 = 0,1906$, $\varphi_2 = -0,3274$, $\varphi_3 = -0,2755$, $\varphi_{4h} = 0,2953$, $\varphi_{4d22} = 0,3394$, $\varphi_{4d21} = 0,2557$, $\varphi_5 = 0,3250$.



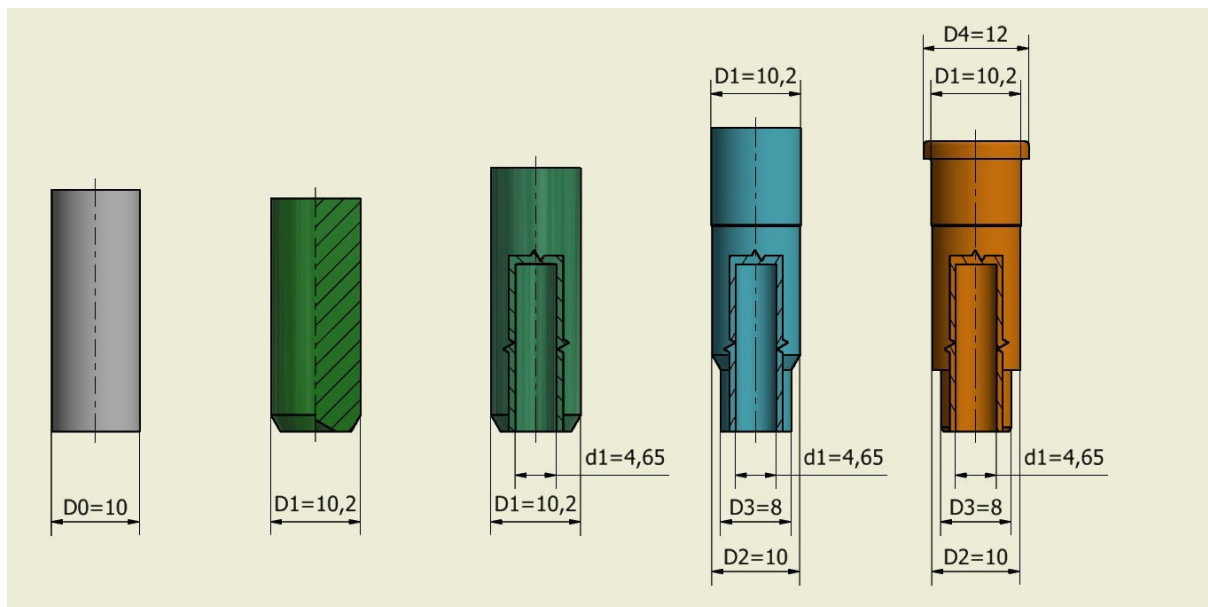
Obr. 39 Schéma tvářecích operací při výrobě pro variantu 2

Rozložení napětí je stále rovnoměrné, avšak přetvoření dosahuje vyšších hodnot. Schéma znázorňující je velikosti jednotlivých napětí v daných částech součásti je na obrázku 40. K vyčerpání plasticity nedojde a zbylá by měla být dostatečná pro tváření závitu. Hodnoty celkových napětí jsou: $\varphi_h = 0,8109$, $\varphi_{d1} = 0,4859$, $\varphi_{d21} = 0,4463$, $\varphi_{d22} = 0,8575$, $\varphi_{d3} = 0,7935$.



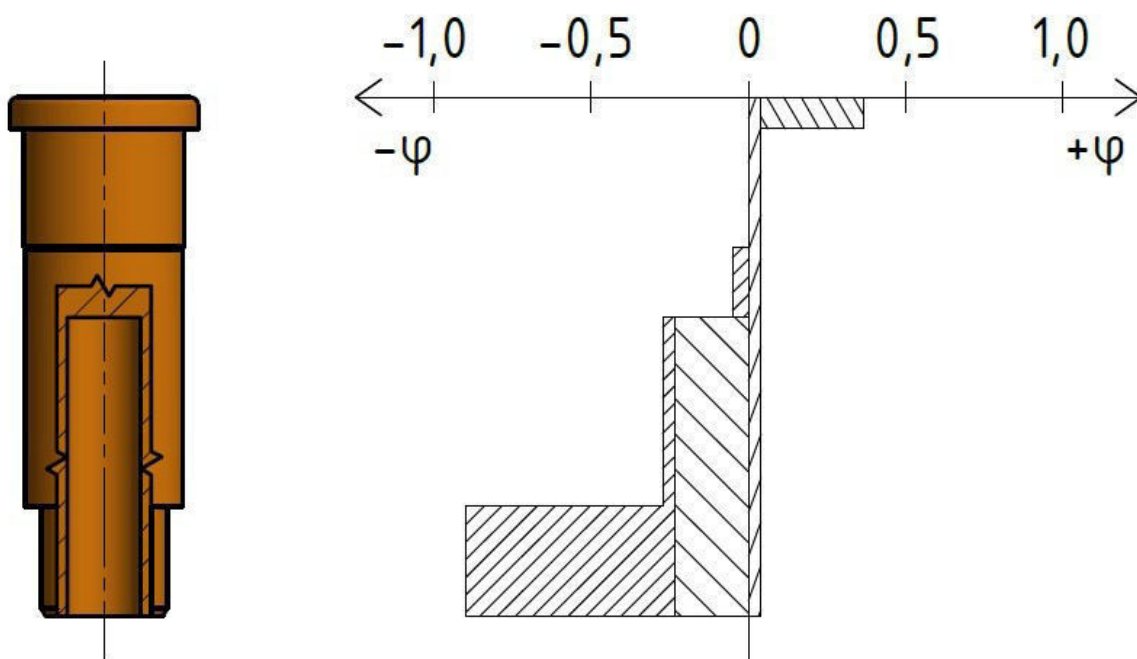
Obr. 40 Schéma přetvoření napříč součástí pro variantu 2

c) Varianta 3 – při ní je výsledný díl získán z polotovaru o průměru $D_0 = 10$ mm. Počet operací se snížil pouze na 5. Dřík₂ už není napěchován, ale protlačen. Postup je uveden na obrázku 42



Obr. 41 Schéma tvařecích operací při výrobě pro variantu 3

Jednotlivá napětí při tvařecích operacích dosahují hodnot: $\varphi_1 = 0,0369$, $\varphi_2 = -0,2330$, $\varphi_{3d22} = -0,0503$, $\varphi_{3d21} = -0,0396$, $\varphi_{3d22} = -0,6652$, $\varphi_{4h} = 0,3250$. Z obrázku 37 je patrné nerovnoměrné rozložení. Z výsledných celkových přetvoření: $\varphi_h = 0,3646$, $\varphi_{d1} = 0,0396$, $\varphi_{d21} = 0,0792$, $\varphi_{d22} = 0,3228$, $\varphi_{d3} = 0,9378$, je patrné velká hodnota na dříku₃, který musí poskytnout dostatečnou zásobu plasticity pro vytvoření závitu.



Obr. 42 Schéma přetvoření napříč součástí pro variantu 3

Z výše uvedených variant je nejvhodnější první. Poskytuje rovnoměrnost rozložení napětí v celém průřezu součásti, zároveň si uchovává dostatečnou plasticitu pro následné tváření závitů v otvoru. Další postup bude volen s ohledem na volbu výroby variantou 1.

3.2 Výpočty rozměrů polotovarů

Na obr. 43 jsou objemy hlavních částí součásti dílce, které byly vypočteny pomocí programu Inventor Professional 2019. Hodnoty jsou uvedeny níže:

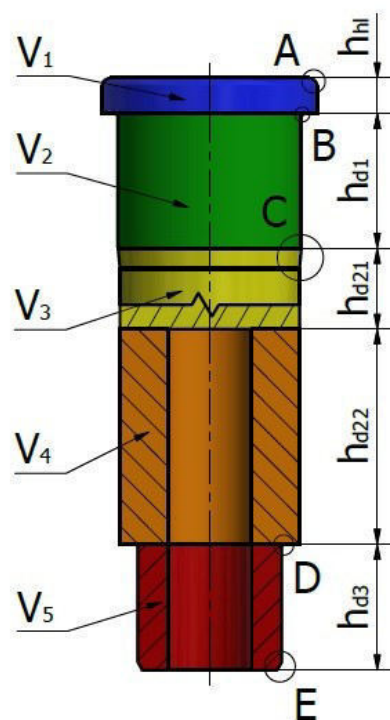
1. $V_1 = 224,21 \text{ mm}^3$ – objem hlavy
2. $V_2 = 613,002 \text{ mm}^3$ – objem dířku 1
3. $V_3 = 355,237 \text{ mm}^3$ – objem dířku 22
4. $V_4 = 738,691 \text{ mm}^3$ – objem dířku 21
5. $V_5 = 231,773 \text{ mm}^3$ – objem dířku 3

K výpočtu rozměrů v jednotlivých operacích výroby je využit zákon zachování objemu, kdy objem tvářeného dílu, případně jeho části je schodný s objemem získaným. Objemy jsou vypočítány pomocí vzorců pro základní geometrické tvary, jakými jsou válce, prstence, kužele apod. Pro zjednodušení je potřeba tvary součásti pozměnit (přidat, či ubrat) o části chybějící, nebo přebývající. Dířek 2 byl pro výpočet rozdělen na dvě části.

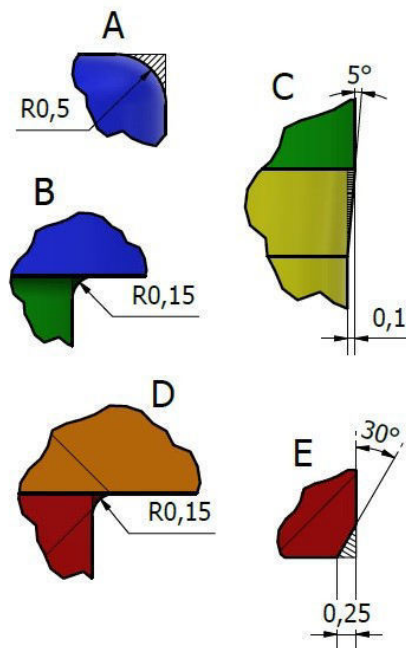
Na obrázku 44 jsou zobrazeny objemy úkosů a přechodů, které jsou důležité pro stanovení hlavních rozměrů součástí. Jejich objemy byly stanoveny pomocí programu Inventor Professional 2019. Hodnoty jsou uvedeny níže:

- a) $V_A = 1,985 \text{ mm}^3$ – objem scházející na hlavě
- b) $V_B = 0,156 \text{ mm}^3$ – objem rádiusu pod hlavou
- c) $V_C = 1,807 \text{ mm}^3$ – objem zkosení mezi dířky 1 a 2
- d) $V_D = 0,122 \text{ mm}^3$ – objem radiusu na dířku 3
- e) $V_E = 1,332 \text{ mm}^3$ – objem zkosení hrany dířku 3
- f) $V_F = 6,887 \text{ mm}^3$
- g) $V_G = 7,188 \text{ mm}^3$
- h) $V_H = 5,09 \text{ mm}^3$

Objemy, které nejsou na obrázku jsou objemy zkosení v dalších operacích, které byly výrobou přetvořeny. Jsou jimi: V_F (objem kužele na čele průtláčníku ve 2 operaci) V_G (objem zkosení při přechování v první operaci) a V_H (objem středícího důlku).

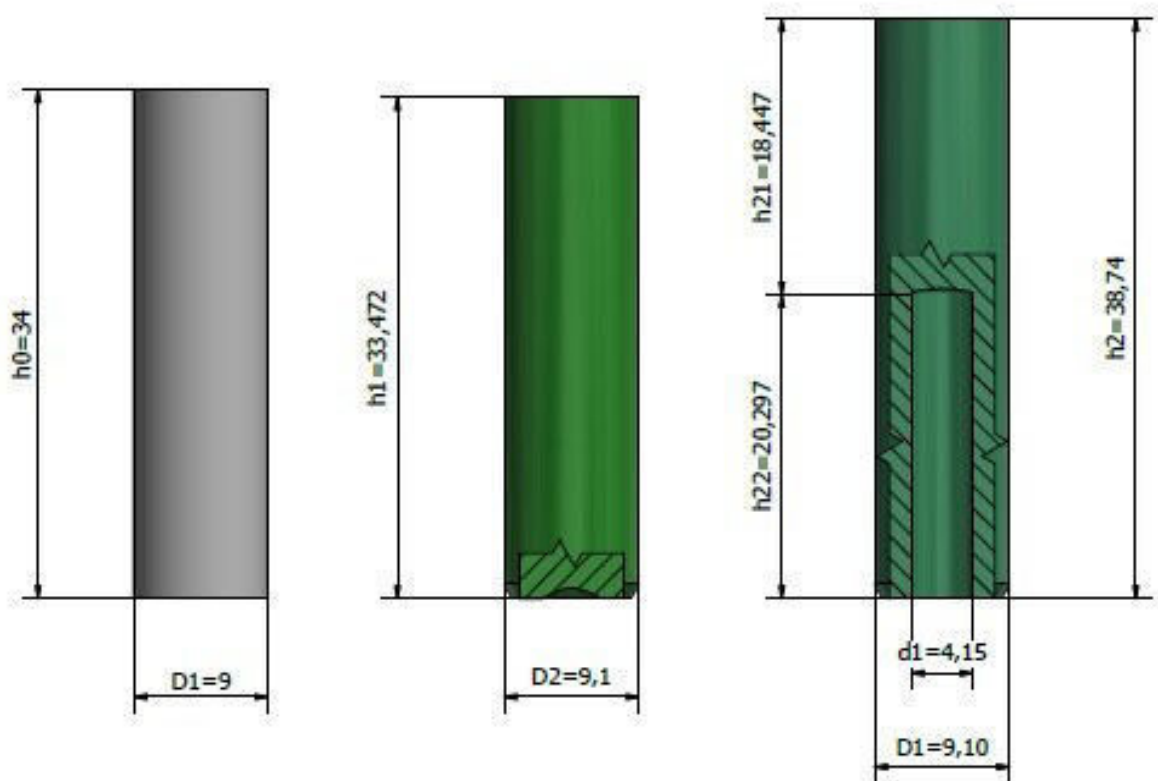


Obr. 43 Objemy součásti



Obr. 44 Details úkosů a rádiusů

Na obrázku 45 jsou uvedeny rozměry součásti po ustřižení, napěchování a zpětném protlačení díry.



Obr. 45 Rozměry pro operace stříhání, pěchování a protlačování

V první operaci dojde k vytvoření zkosení a středícího důlku, jejichž objemy jsou přičteny k celkovému. Poté lze výšku h_1 stanovit.

$$h_1 = \frac{4 \cdot (V + V_G + V_F)}{(\pi \cdot D_1^2)} = \frac{4 \cdot (2162,912 + 7,188 + 6,887)}{(\pi \cdot 9,1^2)} = 33,47 \text{ mm}$$

V druhé operaci je podstatným rozměrem výška h_{22} , která představuje hloubku vytvořené díry. Jednotlivé rozměry jsou vypočteny dle vzorců:

Výška h_{21} představuje výšku válcové části dílu ve 2. operaci

$$h_{21} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_1 + V_5 + V_4 + V_H)}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4 \cdot (224,21 + 231,773 + 738,691 + 5,09)}{\pi \cdot 9,1^2} = 18,447 \text{ mm}$$

Výška h_{22} představuje délku díry vytvořené 2. operací.

$$h_{22} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_3 + V_2 + V_G)}{\pi \cdot (D_1^2 - d_1^2)} = \frac{4 \cdot (355,237 + 613,002 + 7,188)}{\pi \cdot (9,1^2 - 4,65^2)} = 20,297 \text{ mm}$$

Třetí operací vzniká dřík 3 protlačením., zbylá část o průměru $D_1=9,1$ je rozdělena na 2 části (s dírou a bez)

Výška části bez díry je spočtena:

$$h_{31} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_2 + V_3 + V_1)}{\pi \cdot (D_1^2)} = \frac{4 \cdot (613,002 + 355,237 + 224,21)}{\pi \cdot (9,1^2)} = 18,334 \text{ mm}$$

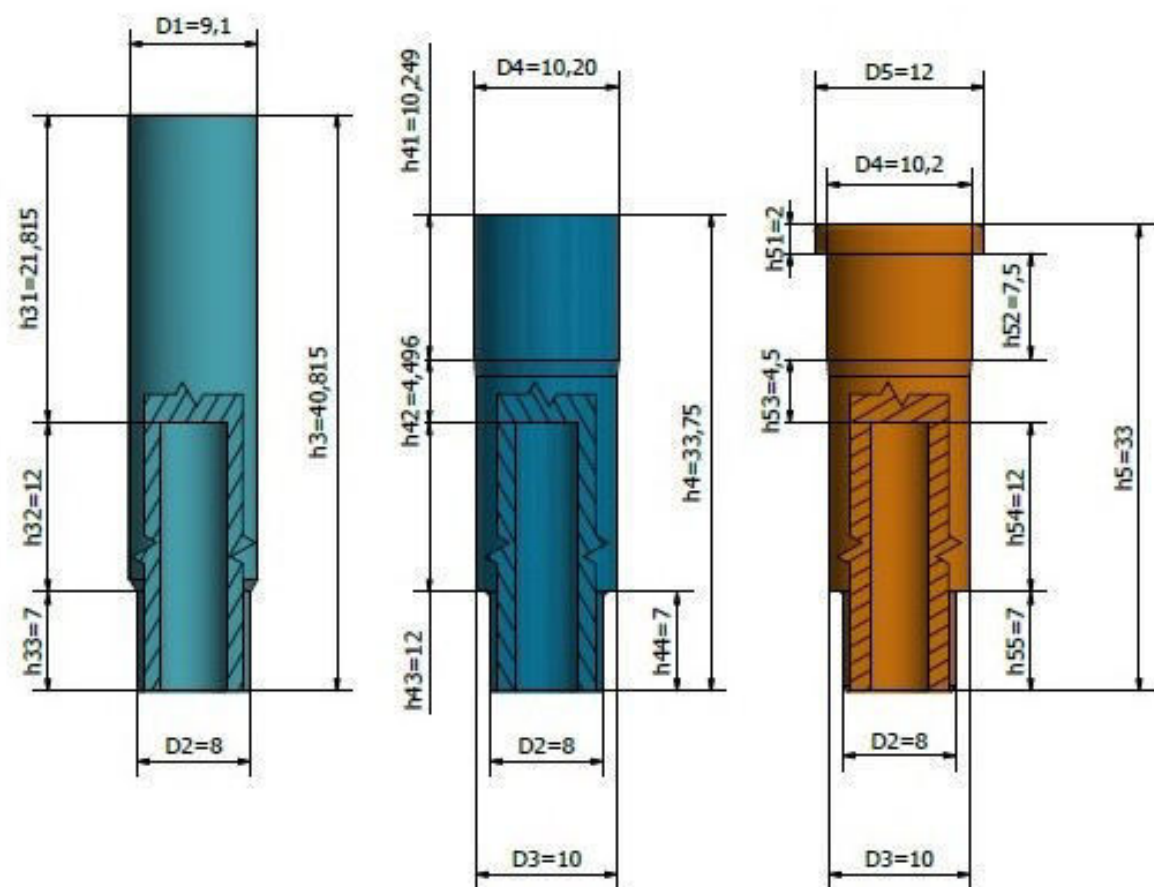
Hodnota pro část s dírou byla získána výpočtem:

$$h_{32} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_4 + V_G)}{\pi \cdot (D_1^2 - d_1^2)} = \frac{4 \cdot (738,691 + 7,188)}{\pi \cdot (9,1 - 4,65)} = 15,521 \text{ mm}$$

Výška protlačeného dříku je:

$$h_{33} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_5 - V_D)}{\pi \cdot (D_2^2 - d_1^2)} = \frac{4 \cdot (231,773 - 0,122)}{\pi \cdot (8 - 4,65)} = 6,960 \text{ mm}$$

Na obrázku 46 jsou uvedeny vypočtené hodnoty pro operace dopředného protlačování, a dvou operací pýchování.



Obr. 46 Rozměry pro operace protlačování a dvou pýchování

Ve 4. operaci se stanovují výšky pro dřík₃, dřík 2 (opět je rozdělen na dvě části) a zbylý materiál, který reprezentuje objem hlavy a dříku₁.

Výška h_{41} představuje výšku materiálu hlavy a dříku₁, vypočte se:

$$h_{41} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_2 + V_1)}{\pi \cdot (D_4^2)} = \frac{4 \cdot (613,002 + 224,21)}{\pi \cdot (10,2)} = 10,246 \text{ mm}$$

Výška napýchovaného dříku 2 se skládá z výšky válcové části a prstencové jejich výšky jsou vypočteny dle vzorců:

$$h_{42} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_3 - V_C)}{\pi \cdot (D_3^2)} = \frac{4 \cdot (355,237 - 1,807)}{\pi \cdot (10)} = 4,500 \text{ mm}$$

$$h_{43} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_4)}{\pi \cdot (D_3^2 - d_1^2)} = \frac{4 \cdot (738,691)}{\pi \cdot (10 - 4,65)} = 12,000 \text{ mm}$$

Posledním počítaný rozměrem pro čtvrtou operaci je výška dříku 3, taje stanovena dle:

$$h_{44} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_5 + V_E)}{\pi \cdot (D_2^2 - d_1^2)} = \frac{4 \cdot (231,773 + 1,332)}{\pi \cdot (8 - 4,65)} = 7,004 \text{ mm}$$

Výpočet rozměrů pro poslední operaci, kdy bude napěchována hlava slouží jako kontrola správnosti vypočteného objemu, jelikož výsledné hodnoty musí souhlasit se zadaným dílcem.

Výška hlavy h_{51} je h_{51} :

$$h_{51} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_1 + V_A)}{\pi \cdot (D_5^2)} = \frac{4 \cdot (224,21 + 1,985)}{\pi \cdot (12)} = 2,000 \text{ mm}$$

Výška dříku 1 je:

$$h_{52} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_2 - V_B)}{\pi \cdot (D_4^2)} = \frac{4 \cdot (613,002 - 0,156)}{\pi \cdot (10,2)} = 7,500 \text{ mm}$$

Výška válcové části dříku 2 je:

$$h_{53} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_3 - V_C)}{\pi \cdot (D_3^2)} = \frac{4 \cdot (355,237 - 1,807)}{\pi \cdot (10)} = 4,500 \text{ mm}$$

Výška části dříku 2, který obsahuje otvor je:

$$h_{54} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_4)}{\pi \cdot (D_3^2 - d_1^2)} = \frac{4 \cdot (738,691)}{\pi \cdot (10 - 4,65)} = 12,000 \text{ mm}$$

Výška dříku 3 je:

$$h_{55} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (V_5 + V_E)}{\pi \cdot (D_2^2 - d_1^2)} = \frac{4 \cdot (231,773 + 1,332)}{\pi \cdot (8 - 4,65)} = 7,004 \text{ mm}$$

3.3 Výpočty tvářecích sil a přetvárných prací [14] [25]

Hodnota výsledná tvářecí síla, ze které vychází volba vhodného tvářecího stroje, odpovídá součtu všech tvářecích sil v jednotlivých operacích. Aby byly stanoveny velikosti tvářecích sil, je nutné vypočíst hodnoty přirozených přetvárných odporů. Přetvárná práce, celková i pro jednotlivé operace, je závislá na objemu materiálu a velikosti tvářecích sil.

Velikosti jednotlivých přetvárných odporů budou stanoveny výpočtem užitím konstruktivní Johnson-Cookovy rovnice (rovnice 3.25). Touto rovnicí je dobře popsáno chování materiálu při vyšších rychlostech deformace. V tabulce 11 jsou vypsány parametry potřebné pro výpočet danou rovnicí.

Vstupní hodnotou pro výpočet rychlosti logaritmického přetvoření, které vstupuje do výpočtu přetvárného odporu, je rychlost pohybu beranu. Pro rovnici stanovení jeho rychlosti je nutné znát parametry tvářecího stroje. Pro výpočet je tedy předběžně zvolen stroj Hatebur COLDMatic 625.

$$v_0 = \frac{s}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot n_{\text{zdvih}} \cdot h_{\text{beranu}}}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 110}{60 \cdot 10^3} = \underline{0,336 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (3.1)$$

kde: h_{beranu} – zdvih beranu [mm],

n_{zdvih} – počet zdvihů beranu za minutu [min^{-1}],

s – celková dráha beranu [mm],

t – čas [s].

Na obrázku 47, viz Příloha 4 je uvedena tabulka ze souboru Excel, použitý pro výpočet, ve které jsou uvedeny vypočtené hodnoty ve všech operacích.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		1op	2op d3/d22	3op d3	4op d22	4op d21	4op d1/h	5 op
2	Rm	614						
3	d0	13						
4	Fs	84758	84,8					
5	fi	0,0221	0,3247	0,6920	0,5723	0,2107	0,2503	0,5754
6	fiz rych	11,0	152,1	0,5	30,6	81,5	35,8	183,3
7	sigmap	701,7	930,0	744,5	901,8	878,7	856,5	977,0
8	sigmad	705,5	1924,0	2138,0	909,8	917,7	873,5	1094,2
9	S	65,039	16,982	33,283	61,558	78,540	81,713	113,097
10	F	45887	32675	71159	56007	72076	71379	123752
11	F kN	45,9	32,7	71,2	56,0	72,1	71,4	123,8
12	sigmaps	575,9	815,9	837,2	823,1	811,6	800,5	916,7
13	Aj	0,0127	0,2469	0,3075	0,2038	0,1531	0,1827	0,2980
14	A	28	240	71	151	54	153	67
15	V	2162,912	970,424	231,733	738,691	355,237	837,212	224,210
16								
17		fi pech	fi zp prot	fi protl	fi pech d22	fi pech d21	fi pech d1/h	fi pech h
18		0,0221	0,3026	0,3673	0,2476	0,1886	0,2282	0,3250
19								
20	FC	472,9 kN						
21	AC	472 J						
22	P	786,7 W						

Obr. 47 Tabulka vypočetných hodnot odporů, sil a práce

• **0. operace** – Operace byla označena za nultou jelikož dochází pouze k oddělení materiálu, což může být provedeno na samostatném stroji, odděleně od ostatních operací. Takový způsob výroby byl zvažován, dokud nebyl zvolen jako výrobní stroj automat. Dělení materiálu tedy bude součástí šestioperačního výrobního postupu.

Pro nultou operaci stříhání se vypočte střížná síla podle vztahu 3.26. Deformační odpor ve stříhu τ_s má hodnotu 80% meze pevnosti.

$$F_s = (1,1 \div 1,3) \cdot S_0 \cdot \tau_s \quad [\text{N}] \quad (3.2)$$

kde: S_0 – obsah střížné plochy [mm]

τ_s – deformační odpor ve stříhu [MPa]

$$F_s = 1,3 \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot (0,8 \cdot R_m) = 1,3 \cdot \frac{\pi \cdot 9^2}{4} \cdot (0,8 \cdot 614) = \underline{40623,4 \text{ N}}$$

- **1. operace** – Ve druhé operaci je pēchováno z $\varnothing D_0 = 9\text{ mm}$ na $\varnothing D_1 = 9,1\text{ mm}$.

Logaritmické pētvoření v 1. operaci:

pētvoření je rozloženo po celé součásti

$$\varphi_{1\text{pech}} = \varphi_1 = \underline{0,022}$$

Maximální rychlost pētvoření v 1. operaci:

Bylo užito vzorce 3.27.

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{v_0}{h_1} = \frac{0,367}{0,03347} = \underline{11,0\text{ s}^{-1}} \quad (3.3)$$

Přirozený pētvárný odpor v 1. operaci:

Vypočten rovnicí Johnson-Cook (rovnice 2.15). Parametry vybrány z tabulky 4.

$$\sigma_{p2} = \left(\sigma_0 + B \cdot \varphi_2^n \right) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_2}{\dot{\varphi}_0} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^2 \right]$$

$$\sigma_{p2} = (450 + 350 \cdot 0,022^{0,18}) \cdot \left(1 + 0,055 \cdot \ln \frac{11,0}{1} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{295 - 293}{1773 - 293} \right)^2 \right] = \underline{701,7\text{ MPa}}$$

Střední hodnota přirozeného pētvárného odporu v 1. operaci:

Představuje polovinu součtu hodnot parametru σ_0 a přirozeného pētvárného odporu současné operace.

$$\sigma_{ps2} = \frac{\sigma_0 + \sigma_{p2}}{2} = \frac{450 + 701,7}{2} = \underline{575,9\text{ MPa}} \quad (3.4)$$

Deformační odpor pro 1. operaci:

Určen rovnicí pro pēchování podel Siebela. Viz vzorec 2.13.

$$\sigma_{d2} = \sigma_{p2} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_1}{h_1} \right)$$

$$\sigma_{d1} = 701,7 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,06 \cdot 9,1}{33,47} \right) = \underline{705,5\text{ MPa}}$$

Tvářecí síla v 1. operaci:

Pro výpočet byl použit vzorec 2.13.

$$F_1 = \sigma_{d2} \cdot S_2 = \sigma_{d2} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 45887\text{ N} = \underline{45,9\text{ kN}}$$

Měrná pētvárná práce A_{j1} v 1. operaci:

Vypočtena následujícím vzorcem 2.9.

$$A_{j1} = \sigma_{ps1} \cdot \varphi_{1\text{pech}} = 575,9 \cdot 0,0221 \cdot 10^{-3} = \underline{0,0127\text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}} \quad (3.5)$$

Pētvárná práce pro 1. operaci:

Výpočet rovnicí 2.14.

$$A_1 = A_{j1} \cdot V = 0,0127 \cdot 2162,912 = \underline{28\text{ J}}$$

- **2. operace** – Ve druhé operaci je zpētně protlacēna díra o průměru $\varnothing d_1 = 4,65\text{ mm}$.

Logaritmické pētvoření pro 2. operaci:

Logaritmické přetvoření φ_2 odpovídá přetvoření φ_3 třetího dířku, v němž se nachází díra pro závit.

$$\varphi_{d3} = \varphi_{1pech} + \varphi_{3dop. protl.} = 0,022 + 0,3026 = \underline{\underline{0,3247}}$$

Maximální rychlost deformace ve 2. operaci:

Nejvyšší hodnoty dosahuje rychlost v ose díry při $R_2 = 0$.

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{v_0}{R_2 \cdot \tan \alpha + 0,002} = \frac{v_0}{0 \cdot \tan 30^\circ + 0,002} = \underline{\underline{183,3 \text{ s}^{-1}}} \quad (3.6)$$

kde: α je vrcholový úhel kužele [rad].

Přirozený přetvárný odpor ve 2. operaci:

Odpory byly vypočítány Johnson-Cookovou rovnicí. Pro dířek byla použita logaritmická deformace $\varphi_{3dřik}$ a pro hlavu φ_{3hlava} . Parametry byly převzaty z tabulky 5.

$$\sigma_{p2d} = (\sigma_0 + B \cdot \varphi_{d3}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_2}{\dot{\varphi}_0}) \cdot [1 - (\frac{T - T_0}{T_m - T_0})^2]$$

$$\sigma_{p2d} = (450 + 350 \cdot 0,3247^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln \frac{183,3}{1}) \cdot [1 - (\frac{295 - 293}{1773 - 293})^2] = \underline{\underline{973,2 \text{ MPa}}}$$

Střední hodnota přirpzeného přetvárného odporu ve 2. operaci:

Představuje polovinu součtu hodnot přirozeného přetvárného odporu předcházející operace a současné operace.

$$\sigma_{ps2} = \frac{\sigma_{p1} + \sigma_{p2d}}{2} = \frac{701,7 + 973,2}{2} = \underline{\underline{841,0 \text{ MPa}}} \quad (3.7)$$

Deformační odpor ve 2. operaci:

Pro výpočet byl použit vzorec 2.12 dle Siebela. K jeho užití je nutné splnit podmínku tloušťky stěny "t". Její hodnoty nesmí být větší než desetina průměru průtláčnicku.

$$t = \frac{D_2 - d_1}{2} = \frac{9,1 - 4,65}{2} = \underline{\underline{2,225 \text{ mm}}} \quad (3.8)$$

$$t > 0,1 \cdot d_1$$

$$2,225 > 0,1 \cdot 6,92$$

$$2,225 > 0,692$$

Podmínka je plněna, můžeme tedy pokračovat ve výpočtu.

$$\sigma_{d2} = 1,152 \cdot \sigma_{p2d} \cdot \frac{D_1^2}{d_1^2} \cdot \left(\log \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_1^2} + \frac{d_1^2}{D_1^2 - d_1^2} \cdot \log \frac{D_1^2}{d_1^2} + \log \frac{d_1^2}{D_1^2 - d_1^2} \right)$$

$$\sigma_{d2} = 1,152 \cdot 937,5 \cdot \frac{9,1^2}{4,65^2} \cdot \left(\log \frac{9,1^2}{9,1^2 - 4,65^2} + \frac{9,1^2}{9,1^2 - 4,65^2} \cdot \log \frac{9,1^2}{4,65^2} + \log \frac{9,1^2}{9,1^2 - 4,65^2} \right)$$

$$\sigma_{d4} = \underline{\underline{1939,5 \text{ MPa}}}$$

Tvářecí síla ve 2. operaci:

$$F_2 = \sigma_{d2} \cdot S_2 = \sigma_{d2} \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = 1924,0 \cdot \frac{\pi \cdot 4,65^2}{4} = 32937 \text{ N} = \underline{\underline{32,9 \text{ kN}}}$$

Měrná přetvárná práce ve 2. operaci:

$$A_{j2} = \sigma_{ps2} \cdot \varphi_{2zpět. protl.} = 930,0 \cdot 0,3026 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,248 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}}$$

Přetvárná práce ve 2. operaci:

$$A_2 = A_{j2} \cdot V = 0,2469 \cdot 970,424 = \underline{\underline{241 J}}$$

• **3. operace** – Ve třetí operaci je dopředně protlačován $\varnothing D_1 = 9,1 \text{ mm}$ obsahující vnitřní otvor o průměru $\varnothing d_1 = 4,65 \text{ mm}$.

Logaritmické přetvoření ve 3. operaci:

$$\varphi_{d3} = \varphi_{1\text{pech}} + \varphi_{2\text{zpět. protl.}} + \varphi_{3\text{dop. protl.}} = 0,0221 + 0,3026 + 0,231,733 = \underline{\underline{0,6920}}$$

Maximální rychlost deformace ve 3. operaci:

$$\dot{\varphi}_3 = 2 \cdot v_0 \frac{R_1^2 - r_1^2}{R_2^2 - r_1^2} \cdot \text{tg } \alpha = 2 \cdot 0,367 \frac{4,55^2 - 2,325^2}{4^2 - 2,325^2} \cdot \text{tg } 30^\circ = \underline{\underline{0,5 \text{ s}^{-1}}} \quad (3.9)$$

Přirozený přetvárný odpor ve 3. operaci:

Stanoven dle Johnson-Cookovy rovnice 3.24. Použité parametry jsou z tabulky 4.

$$\sigma_{p3} = (\sigma_0 + B \cdot \varphi_{d3}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_3}{\dot{\varphi}_0} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^2 \right]$$

$$\sigma_{p3} = (450 + 350 \cdot 0,6920^{0,18}) \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \ln \frac{74,5}{1} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{295 - 293}{1773 - 293} \right)^2 \right] = \underline{\underline{744,5 \text{ MPa}}}$$

Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu ve 3. operaci:

Představuje polovinu součtu hodnot přirozeného přetvárného odporu předcházející operace a současné operace.

$$\sigma_{ps23} = \frac{\sigma_{p3} + \sigma_{p3}}{2} = \frac{937,5 + 744,5}{2} = \underline{\underline{841,0 \text{ MPa}}} \quad (3.10)$$

Deformační odpor ve 3. operaci:

Bylo užito výpočtu dle Feldmanna pro dopředné protlačování.

$$\sigma_{d3} = \sigma_{ps23} \cdot \varphi \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\varphi_3} + 2 \frac{f}{\alpha} \right) + \pi \cdot D_1 \cdot L_1 \cdot \frac{f}{S_1} \sigma_{p3}$$

$$\sigma_{d3} = 841,0 \cdot \varphi \left(1 + \frac{1}{2} \frac{10}{0,6920} + 2 \frac{0,06}{10} \right) + \pi \cdot 9,1 \cdot 33,85 \frac{0,06}{27,96} 744,5 = \underline{\underline{2140,6 \text{ MPa}}}$$

Tvářecí síla ve 3. operaci:

$$F_3 = \sigma_{d3} \cdot S_3 = \sigma_{d3} \cdot \frac{\pi \cdot (D_2^2 - d_1^2)}{4} = 2140,6 \cdot \frac{\pi \cdot (8^2 - 4,65^2)}{4} = 71247 \text{ N} = \underline{\underline{71,2 \text{ kN}}}$$

Měrná přetvárná práce ve 3. operaci:

$$A_{j3} = \sigma_{ps3} \cdot \varphi_{3\text{dop. protl.}} = 841,0 \cdot 0,3673 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,3089 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}}$$

Přetvárná práce ve 3. operaci:

$$A_3 = A_{j3} \cdot V_3 = 0,3075 \cdot 231,733 = \underline{\underline{72 J}}$$

• **4. operace** - součást je pýchována téměř po celé délce, výjimku tvoří nejmenší dřík.

Logaritmické přetvoření pro 4. operaci:

$$\varphi_{d22} = \varphi_{1\text{pech}} + \varphi_{2\text{zp. protl.}} + \varphi_{4\text{pech22}} = 0,0221 + 0,3026 + 0,2476 = \underline{\underline{0,5723}}$$

$$\varphi_{d21} = \varphi_{1\text{pech}} + \varphi_{4\text{pech21}} = 0,0221 + 0,1886 = \underline{\underline{0,2107}}$$

$$\varphi_{d1} = \varphi_h = \varphi_{1\text{ pech}} + \varphi_{4\text{ pech1}} = 0,0221 + 0,2282 = \underline{0,2503}$$

Maximální rychlost deformace ve 4. operaci:

$$\dot{\varphi}_{4d22} = \frac{v_0}{h_{43}} = \frac{0,5723}{0,012} = \underline{30,6\text{ s}^{-1}}$$

$$\dot{\varphi}_{4d21} = \frac{v_0}{h_{42}} = \frac{0,2107}{0,0045} = \underline{81,5\text{ s}^{-1}}$$

$$\dot{\varphi}_{4d1} = \dot{\varphi}_{4h} = \frac{v_0}{h_{43}} = \frac{0,2503}{0,012} = \underline{35,8\text{ s}^{-1}}$$

Přirozený přetvárný odpor ve 4. operaci:

Odpory byly vypočítány Johnson-Cookovou rovnicí. Parametry byly převzaty z tabulky 4.

$$\sigma_{p4d22} = (\sigma_0 + B \cdot \varphi_{4d22}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{4d22}}{\dot{\varphi}_0}) \cdot [1 - (\frac{T - T_0}{T_m - T_0})^2]$$

$$\sigma_{p4d22} = (450 + 350 \cdot 0,5723^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln \frac{30,6}{1}) \cdot [1 - (\frac{295 - 293}{1773 - 293})^2] = \underline{901,8\text{ MPa}}$$

$$\sigma_{p4d21} = (\sigma_0 + B \cdot \varphi_{4d21}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{4d21}}{\dot{\varphi}_0}) \cdot [1 - (\frac{T - T_0}{T_m - T_0})^2]$$

$$\sigma_{p4d21} = (450 + 350 \cdot 0,2107^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln \frac{81,5}{1}) \cdot [1 - (\frac{295 - 293}{1773 - 293})^2] = \underline{878,7\text{ MPa}}$$

$$\sigma_{p4d1} = \sigma_{p4h} = (\sigma_0 + B \cdot \varphi_{4d1}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{4d1}}{\dot{\varphi}_0}) \cdot [1 - (\frac{T - T_0}{T_m - T_0})^2]$$

$$\sigma_{p4h} = (450 + 350 \cdot 0,2503^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln \frac{35,8}{1}) \cdot [1 - (\frac{295 - 293}{1773 - 293})^2] = \underline{856,5\text{ MPa}}$$

Střední hodnota přirpzeného přetvárného odporu ve 4. operaci:

Představuje polovinu součtu hodnot přirozeného přetvárného odporu předcházející operace a současné operace.

$$\sigma_{ps4d22} = \frac{\sigma_{p3} + \sigma_{p4d22}}{2} = \frac{744,5 + 901,8}{2} = \underline{823,1\text{ MPa}} \quad (3.11)$$

$$\sigma_{ps4d21} = \frac{\sigma_{p3} + \sigma_{p4d21}}{2} = \frac{744,5 + 878,7}{2} = \underline{811,6\text{ MPa}} \quad (3.12)$$

$$\sigma_{ps4d1} = \sigma_{ps4h} = \frac{\sigma_{p3} + \sigma_{p4d1}}{2} = \frac{744,5 + 856,8}{2} = \underline{800,5\text{ MPa}} \quad (3.13)$$

Deformační odpor ve 4. operaci:

Pro výpočet byl použit vzorec (2.13) dle Siebela.

$$\sigma_{d4d22} = \sigma_{ps4d22} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_3}{h_{43}}\right) = 823,1 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,06 \cdot 9,1}{12}\right) = \underline{909,8\text{ MPa}}$$

$$\sigma_{d4d21} = \sigma_{ps4d21} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_3}{h_{42}}\right) = 811,6 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,06 \cdot 9,1}{4,5}\right) = \underline{917,7\text{ MPa}}$$

$$\sigma_{d4d1} = \sigma_{d4h} = \sigma_{ps4d1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_4}{h_{41}}\right) = 800,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,06 \cdot 10,2}{10,25}\right) = \underline{\underline{873,5 \text{ MPa}}}$$

Tvářecí síla ve 4. operaci:

$$F_{4d22} = \sigma_{d4d22} \cdot S_{4d22} = \sigma_{d4d22} \cdot \frac{\pi \cdot (D_3^2 - d_1^2)}{4} = 909,8 \cdot \frac{\pi \cdot (10^2 - 4,65^2)}{4} = 56007 \text{ N} = \underline{\underline{56,0 \text{ kN}}}$$

$$F_{4d21} = \sigma_{d4d21} \cdot S_{4d21} = \sigma_{d4d21} \cdot \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} = 917,7 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 72079 \text{ N} = \underline{\underline{72,1 \text{ kN}}}$$

$$F_{4d1} = F_{4h} = \sigma_{d4d1} \cdot S_{4d1} = \sigma_{d4d1} \cdot \frac{\pi \cdot D_4^2}{4} = 873,5 \cdot \frac{\pi \cdot 10,2^2}{4} = 71379 \text{ N} = \underline{\underline{71,4 \text{ kN}}}$$

Měrná přetvárná práce ve 4. operaci:

$$A_{j4d22} = \sigma_{ps4d22} \cdot \varphi_{4pech22} = 823,1 \cdot 0,2476 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,2038 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}}$$

$$A_{j4d21} = \sigma_{ps4d21} \cdot \varphi_{4pech21} = 811,6 \cdot 0,1886 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,1531 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}}$$

$$A_{j4d1} = A_{j4h} = \sigma_{ps4d1} \cdot \varphi_{4pech1} = 800,5 \cdot 0,2282 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,1827 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}}$$

Přetvárná práce ve 4. operaci:

$$A_{4d22} = A_{j4d22} \cdot V_4 = 0,2038 \cdot 738,691 = \underline{\underline{151 \text{ J}}}$$

$$A_{4d21} = A_{j4d21} \cdot V_3 = 0,1531 \cdot 355,237 = \underline{\underline{54 \text{ J}}}$$

$$A_{4d1} = A_{4h} = A_{j4d1} \cdot (V_1 + V_2) = 0,2038 \cdot 837,212 = \underline{\underline{153 \text{ J}}}$$

• **5. operace** - V páté operaci je přechována halva čepu na průměr $\varnothing D_5 = 12 \text{ mm}$.

Logaritmické přetvoření v 5. operaci:

$$\varphi_{5h} = \varphi_{1pech} + \varphi_{4pech} + \varphi_{5pech} = 0,0221 + 0,2282 + 0,3250 = \underline{\underline{0,5754}}$$

Maximální rychlost deformace v 5. operaci:

$$\dot{\varphi}_5 = \frac{v_0}{h_{51}} = \frac{0,367}{0,002} = \underline{\underline{183,3 \text{ s}^{-1}}}$$

Přirozený přetvárný odpor v 5. operaci:

Výpočet byl učiněn na základě Johnson-Cookovy rovnice. Potřebné parametry jsou uvedeny v tabulce 4.

$$\sigma_{p5} = (\sigma_0 + B \cdot \varphi_{5h}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{5h}}{\dot{\varphi}_0}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^2\right]$$

$$\sigma_{p5} = (450 + 350 \cdot 0,5754^{0,18}) \cdot \left(1 + 0,055 \cdot \ln \frac{183,3}{1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{295 - 293}{1773 - 293}\right)^2\right] = \underline{\underline{997,0 \text{ MPa}}}$$

Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu v 5. operaci:

Představuje polovinu součtu hodnot přirozeného přetvárného odporu předcházející operace a současné operace.

$$\sigma_{ps5} = \frac{\sigma_{p4d1} + \sigma_{p5}}{2} = \frac{856,5 + 1094,2}{2} = \underline{\underline{916,7 \text{ MPa}}} \quad (3.14)$$

Deformační odpor v 5. operaci:

Výsledná hodnota byla stanovena výpočtem vzorce (2.13) podle Siebela.

$$\sigma_{d5} = \sigma_{p5} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_5^2}{h_{51}} \right) = 1094,2 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,06 \cdot 12^2}{2} \right) = \underline{\underline{1094,2 \text{ MPa}}}$$

Tvářecí síla v 5. operaci:

$$F_5 = \sigma_{d5} \cdot S_5 = \sigma_{d5} \cdot \frac{\pi \cdot D_5^2}{4} = 1094,2 \cdot \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = 123752 \text{ N} = \underline{\underline{123,8 \text{ kN}}}$$

Měrná přetvárná práce v 5. operaci:

$$A_{j5} = \sigma_{ps5} \cdot \varphi_{5 \text{ pech}} = 916,7 \cdot 0,3250 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,2980 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}}$$

Přetvárná práce pr 5. operaci:

$$A_5 = A_{j5} \cdot V_1 = 0,2980 \cdot 224,21 = \underline{\underline{67 \text{ J}}}$$

Celková tvářecí síla:

$$F_C = \sum_{i=2}^{n5} F_i = F_1 + F_2 + F_3 + F_{4d22} + F_{4d21} + F_{4d1} + F_5$$

$$F_C = 45,9 + 32,7 + 71,2 + 56,0 + 72,1 + 71,4 + 123,8 = \underline{\underline{472,9 \text{ kN}}}$$

Celková přetvárná práce:

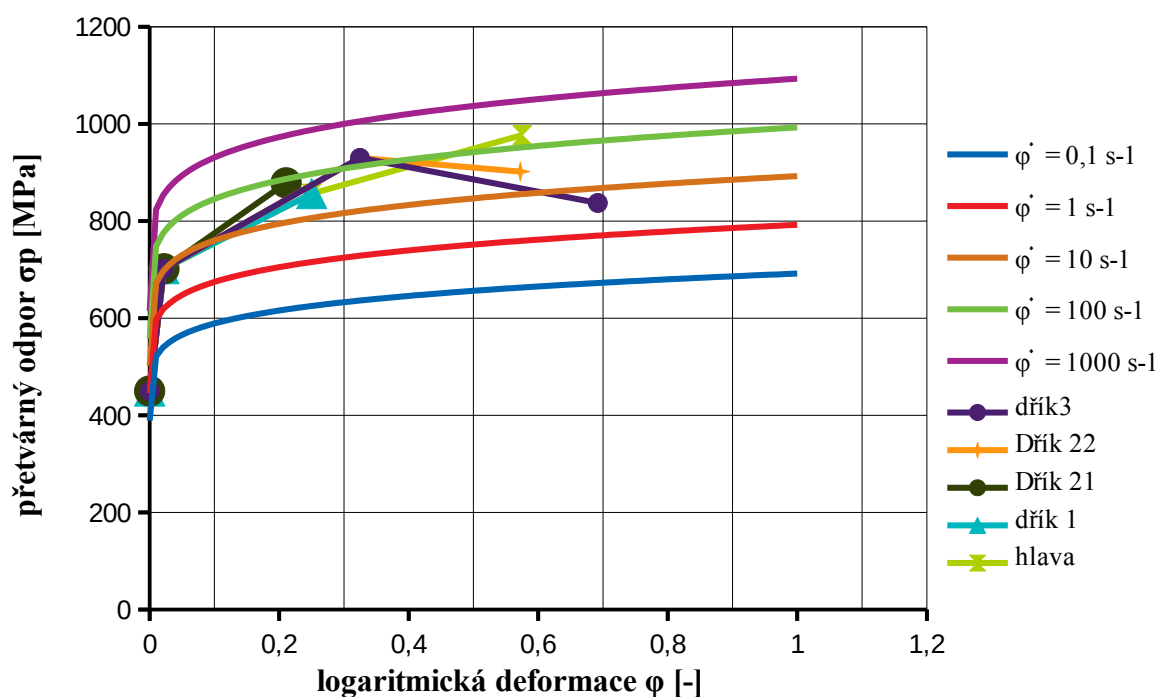
$$A_C = \sum_{i=2}^{n5} A_i = A_1 + A_2 + A_3 + A_{4d22} + A_{4d21} + A_{4d1} + A_5 = 28 + 240 + 7 + 151 + 54 + 153 + 67$$

$$A_C = \underline{\underline{472 \text{ J}}}$$

Potřebný výkon stroje:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{A \cdot n}{60} = \frac{472 \cdot 100}{60} = \underline{\underline{786,7 \text{ W}}}$$

Na obrázku 48 jsou uvedeny křivky přetvárných odporů získaných z předešlých výpočtů pro zvolenou variantu výroby.



Obr. 48 Křivky výsledných přetvárných odporů

3.4 Volba stroje [27]

Na základě vypočtených hodnot pro zvolenou variantu výroby bude volen tvářecí stroj. Základními parametry jsou síla a výkon stroje. U tvářecích automatů je rozhodující i počet operací. Počet operací ve výrobním procesu byl rozhodující pro volbu stroje. Byl zvolen šestioperační stroj HATEBUR COLDMatic 625. V tabulce 10 jsou uvedeny jeho parametry. Stroj má celkovou sílu 2500 kN, kdy pro každou operaci je možné dodat sílu až 1000 kN, což je více než dvakrát větší síla potřebná pro celý tvářecí proces. Všechny hodnoty jsou uvedeny v Příloze 2.



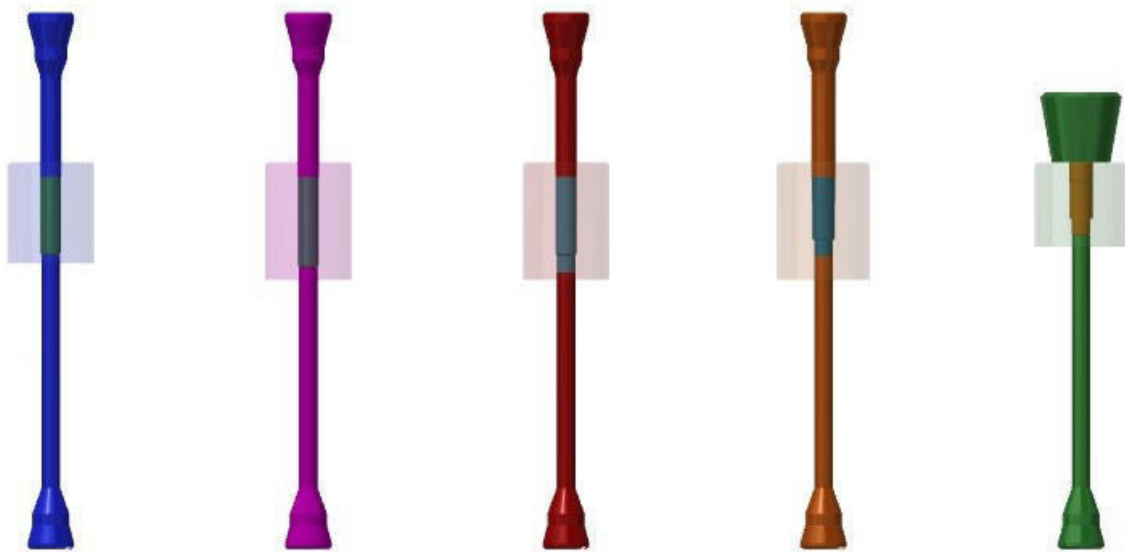
Obr. 49 Stroj HATEBURCOLDMatic625

Tab. 10 Parametry stroje HATEBUR COLDMatic625.

Počet stanic	6	
Vstupní materiál		
Max.průměr	20	mm
Max. pevnost v tahu	600	MPa
Délka ústřížku	8-125	mm
Parametry stroje		
Jmenovitá síla	2500	kN
Výkon	83	kW
Počet zdvihu / min	110-180	min ⁻¹
Výška zdvihu	130	mm
Rozměry stroje		
Délka	6800	mm
Šířka	4150	mm
Výška	2880	mm
hmotnost	60	t

3.5 Návrh nástroje pro 2. operaci [1]

Sestava jednotlivých nástrojů pro dané operace je vždy složena ze 3 hlavních částí, kromě nástroje sloužícího k ustřižení špalíku polotovaru. Jsou jimi pýchovník, či průtlačník, protikusem je pýchovnice a průtlačnice. K vyjmutí součásti z dutiny nástrojů slouží vyhazovače. Na obrázku 50, vymodelovaném pomocí programu Inventor Professional 2019 je zobrazeno uložení jednotlivých nástrojů v daných operacích.



Obr. 50 Schéma uložení nástrojů

Při návrhu průtlačnice je potřeba brát v úvahu vysoké hodnoty radiálního namáhání a napětí. Na jeho velikosti záleží při rozhodování zda bude průtlačnice pojištěna objímkou, případně dvěma. Stanový se výpočtem dle následující rovnice:

$$\sigma_r = \sigma_p \cdot \left[\frac{4 \cdot f_{2st} \cdot b}{D - d} + 1 \right] \quad [\text{MPa}] \quad (3.15)$$

$$\sigma_r = \sigma_{p2} \cdot \left[\frac{4 \cdot f_{2st} \cdot b}{D - d} + 1 \right] = 937,5 \cdot \left[\frac{4 \cdot 0,06 \cdot 18,44}{9,1 - 4,65} + 1 \right] = 932,4 \text{ MPa}$$

Pokud dosahuje radiální napětí hodnot mezi 1600MPa až 2000MPa, je zvoleno zapouzdření do 2 objímk. Při dosažení hodnoty mezi 1000MPa až 1600MPa, je zapouzdřeno do jedné objímky. Pro napětí pod hodnotou 1000MPa není nutné použít zapouzdření.

Radiální napětí vyšlo pod hodnotou 1000MPa, přesto jsem se však rozhodl průtlačnici zapouzdřit průtlačnici do jedné objímky, viz Výkres sestavy. Pro stanovení dělicího průměru bylo vycházeno z optimálního poměru $r_2/r_1 = (1,8 - 2,0)$, r_1 představuje poloměr součásti a poloměr r_2 je dělicí průměr mezi objímkou a průtlačnicí.

$$r_2 = 2 \cdot r_1 = 2 \cdot 9,1 = 18,2 \text{ mm} \rightarrow \text{zvolen dělicí poloměr } r_2 = 18,5 \text{ mm}$$

Při výrobě je potřeba dodržet předepsané tolerance, jinak by mohlo dojít k poškození nástroje, jelikož by nástroj neodolal vysokým tlakům. Pokud je nutno pouzdit za tepla, nesmí dojít překročení popouštěcí teploty, čímž by došlo ke snížení tvrdosti nástroje a jeho degradaci.

Pro výpočet byl použit i ruční výpočet pomocí Excelu. Všechny hodnoty jsou uvedeny v Příloze 4.

Materiál průtlačnice:	Slinutý karbid SK64
modul pružnosti:	$E_1 = 490000\text{MPa}$
Poissonovo číslo:	$\mu_1 = 0,26$
Koeficient tepelné roztažnosti:	$\alpha_1 = 0,0000065$
Mez pevnosti v tahu:	$R_{m1} = 1000\text{MPa}$
Mez pevnosti v tlaku:	$R_{m2} = 3400\text{Mpa}$
Dovolené napětí:	$\sigma_{D1} = 750\text{MPa}$
vnitřní poloměr:	$r_1 = 13\text{mm}$

Materiál objímky:	19 740
modul pružnosti:	$E_1 = 207000\text{MPa}$
Poissonovo číslo:	$\mu_1 = 0,3$
Koeficient tepelné roztažnosti:	$\alpha_1 = 0,0000136$
Mez pevnosti v tlaku:	$R_{m2} = 1480\text{Mpa}$
Mez kluzu:	$R_{p0,2} = 1390\text{MPa}$
Dovolené napětí:	$\sigma_{D2} = 1525\text{MPa}$
Popouštěcí teplota:	$T_{\text{pop}} = 600\text{ }^\circ\text{C}$
Vnější poloměr:	$r_3 = 33,5\text{ mm}$

Teplota okolí:	$T_{\text{okolí}} = 21\text{ }^\circ\text{C}$
----------------	---

Vypočtené hodnoty:

Poměrný dělicí poměr:	$r_1/r_2 = 1,45$
Maximální radiální tlak:	$p_1 = 1081,8\text{MPa}$
Kontaktní tlak:	$p_2 = 684,9\text{MPa}$
Delicí poloměr:	$r_2 = 18,85\text{mm}$
Vypočtený přesah:	$2\Delta r_c = 0,294$
Kontaktní napětí:	$\bar{p}_2 = 544,8\text{MPa}$
Stažení vnějšího otvoru průtlačnice:	$2\Delta r_2 = 0,02955$
Roztažení vnitřního průměru objímky:	$2\Delta r_{22} = 0,11726$
Zvětšení kontaktního tlaku od p_1 :	$p'_2 = 140,1\text{MPa}$
Konstrukční přesah:	$2\Delta r_s = 0,09226$
Stažení funkčního průměru lisovnice:	$2\Delta r_1 = 0,05513$

Teplota potřebná k ohřevu objímky:	$T_2 = 560\text{ }^\circ\text{C}$
Teplota potřebná k ochlazení lisovnice:	$T_1 = -187,2\text{ }^\circ\text{C}$

V této operaci nástroj (pěchovník) napěchuje díl na vyhazovač, čímž je zpětně protlačena díra. Jedná se o nástroj válcového tvaru. Pro návrh pěchovníku byly rozměry voleny podle doporučených hodnot.

Pěchovník má rovné čelo o průměru:

$$d_1 = 9,1 \text{ mm}$$

Průměr dřívku:

$$d_2 = d_1 \cdot 1,3 = 9,1 \cdot 1,3 = 11,83$$

→ byl zvolen $d_2 = 14 \text{ mm}$, jelikož v předchozích i následujících operacích bude užito stejné konstrukce

Průměr hlavy k upnutí:

$$d_3 = d_2 \cdot 1,6 = 14 \cdot 1,6 = 22,4 \text{ mm}$$

→ byl zvolen průměr $d_3 = 20 \text{ mm}$

Délka pracovní části:

$h_1 = 43,2 \text{ mm}$ - volen s ohledem na schodnost nástrojů v různých operacích

Délka válcové části dřívku:

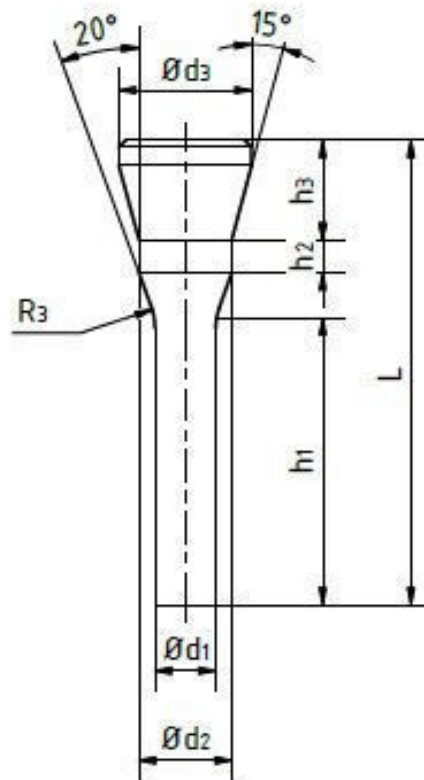
$$h_2 = d_2 / 2 = 14 / 2 = 7 \text{ mm} \rightarrow \text{zvoleno } 5 \text{ mm}$$

Délka upínací hlavy:

$$h_3 = d_3 / 3 = 20 / 3 = 6,67 \text{ mm} \rightarrow \text{zvoleno } 15 \text{ mm, jelikož je vyráběn s úhlem } 15^\circ$$

Zaoblení přechodu do stopky:

$$R_3 = 0,7 \cdot d_1 = 0,7 \cdot 9,1 = 6,37 \text{ mm} \rightarrow \text{zvoleno } 9 \text{ mm}$$



Obr. 51 Pěchovník -schéma rozměrů

V 2. operaci je Trn využit jako nástroj pro tváření otvoru pro závit. Jeho konstrukce bude provedena, jakožto průtláčnicku pro zpětné protlačení. Konstrukce bude provedena bez doporučeného odlehčení. Pokud by bylo zkonstruováno, snížilo by se kontaktní tření. Avšak hrozí zde nebezpečí zatečení materiálu do odlehčení, což by znemožnilo bezpečné vyjmutí dílce. Pro tento nástroj je zvolena ocel 19830 ($R_d = 3670 \text{ MPa}$).

Jmenovitý průměr vyhazovače je voleno s ohledem na nutnost tváření závitu. Byl zvolen na základě doporučených hodnot společností DORMER, která vyrábí tvářecí závitníky.

$$d_1 = 4,65 \text{ mm}$$

tuto hodnotu lze vypočít vzorcem:

$$D = D_{nom} - 0,0068 \cdot P \cdot 65 \quad (3.16)$$

kde: D je průměr díry [mm]

D_{nom} je nominální hodnota průměru závitu [mm]

P je stoupání závitu [mm]

$$d_1 = 5 - 0,0068 \cdot 0,8 \cdot 65 = 4,6464 = 4,65 \text{ mm}$$

Průměr dřívku d_2 :

$$d_2 = 8 \text{ mm}$$

Průměr hlavy k upnutí:

$$d_4 = d_2 \cdot 1,6 = 8 \cdot 1,6 = 12,8 \text{ mm} \rightarrow \text{byl zvolen průměr } d_4 = 16 \text{ mm}$$

Délka pracovní části:

$h_1 = 20,96 \text{ mm}$ → voleno s ohledem na schodnost objemů při tvářecích operacích, jelikož musí být dost materiálu k protlačení dříku 3 a napěchování dříku 2

Délka vyhazovací části:

$h_2 = 105,04 \text{ mm}$ → zvoleno, aby bylo zaručeno uložení na stejné rovině jako ostatní vyhazovače. Je potřeba zajistit dostatečnou délku pro vyhození součásti.

Délka válcové části dříku:

$h_3 = d_3 / 2 = 16 / 2 = 8 \text{ mm}$ → zvoleno 5 mm, aby mohly být vyhazovače zajištěny stejně.

Délka upínací hlavy:

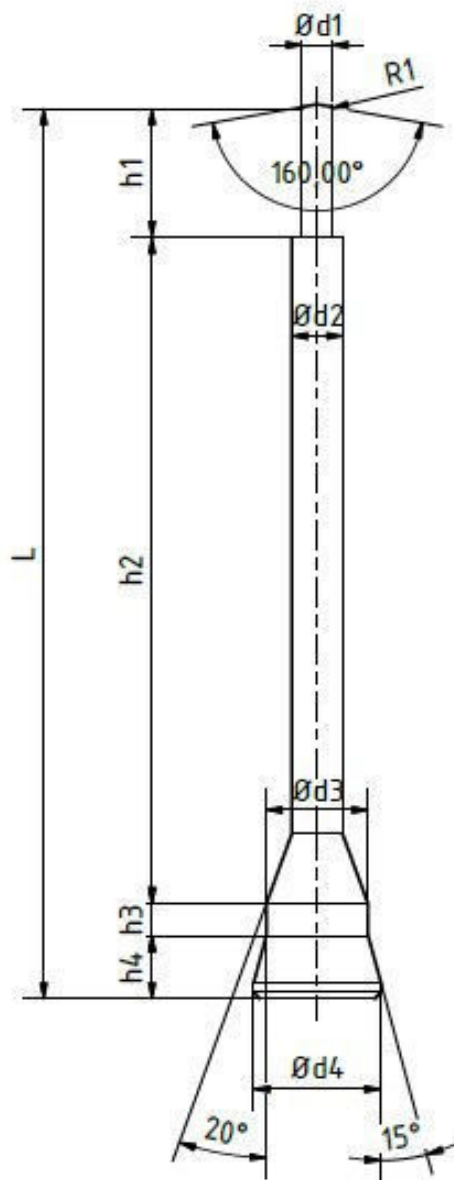
$$h_4 = d_4 / 3 = 20 / 2 = 10 \text{ mm}$$

Vrcholový úhel α je zvolen 160°

Zaoblení hrany čela:

$$R_1 = 0,3 \text{ mm}$$

Pro vypočtené a zvolené nástroje byla navržena sestava pro uložení ve stroji HATEBUR COLDMatic 625. Zvolené tolerance viz výkresová dokumentace.



Obr. 52 Pěchovník -schéma rozměrů

4 ZÁVĚRY

Cílem mé diplomové práce je návrh technologie výroby čepu ozubeného kola, který slouží k ustavení kola v kuželovém ložisku. Je vyroben z oceli 11 320.3 (11 320 5R). Tato ocel je vhodná pro tváření za studena.

V úvodu se práce zabývá volbou vhodné technologie výroby a jejím následným podrobnějším rozbořem. S přihlédnutím na množství vyrobených kusů za rok a požadovanou přesnost, byla zvolena jako nejvhodnější technologie objemového tváření za studena.

Pomocí zvolené technologie je řešen návrh výroby, kdy bylo voleno mezi třemi variantami, z nichž nejvhodnější byla varianta 1. Dochází k rovnoměrnému rozložení přetvoření a výsledné celkové hodnoty umožní ve tvářeném otvoru zhotovit závit. Polotovarem je drát o průměru 9 mm. Celková potřebná síla byla stanovena jako $F_c = 472,9 \text{ kN}$. K výrobě byl zvolen postupový automat COLDMatic 625 od společnosti HATEBUR, kdy jeho jmenovitá síla je 2500 kN.

Dále byl proveden návrh postupového nástroje, k němuž byla dodána výkresová dokumentace pro nástroje druhé operace. Byli zvoleny optimální parametry nástrojů, pomocí výpočtů odpovídajících parametrů. Průtlačnice bude zapouzdřena jedné objímce a rozměry průtlačnku a trnu byli navrhnuty s ohledem na doporučené hodnoty.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [32]

- 1 DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447479.
- 2 BABOR, Karel, Jan FIALA a Augustin CVILINEK. *Objemové tváření oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1967. Řada strojírenské literatury. ISBN 80-214-2854-9.
- 3 BLAŠČÍK, František a Karol POLÁK. *Teória tvárnenia: celoštátna vysokoškolská učebnica pre strojnícke fakulty vysokých škôl*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1987. Edícia strojárkej literatúry.
- 4 DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 1. BRNO: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-2032-4.
- 5 FOREJT, Milan. Databáze materiálových modelů k predikci chování materiálů v tvářecím procesu. *Odbor technologie tváření kovů a plastů* [online]. Brno: Ústav strojírenské technologie FSI VUT Brno, 2004, 2004 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/index.php?stranka=databaze>
- 6 PFROGNER, František a Alois MOJŽÍŠ. *Základy teorie a technologie tváření kovů*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1981.
- 7 Cold Forging Vs. Hot Forging – Considerations, Benefits And Drawbacks. Farinia Group Focused on innovation [online]. Paris: Farinia Group Focused on innovation, 2014, 1. Oct. 2014 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/blog/cold-forging-vs-hot-forging-considerations-benefits-and-drawbacks>
- 8 Cold Heading & Cold Headed Parts. *WCS industries* [online]. Muskego, Wisconsin: WCS industries, 2021, 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.wcsindustries.com/cold-headed-machined-manufacturer/>
- 9 *Tech magazín: Nejrychlejší spojení se světem průmyslové techniky* [online]. Praha: TECH MEDIA PUBLISHING, s r.o., 2010 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: www.techmagazin.cz
- 10 *Kování z hliníku a oceli: Design a výroba* [online]. Ouhai, China, 2020 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.hotforgingchina.com/>
- 11 *Nástroje Temsa* [online]. APKPure, 2014-2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://apkpure.com/temsa-tooling/tv.Produktia.Temsa>
- 12 LENFELD, Petr. *Technologie tváření kovů*. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní. Dostupné z: <https://www.ksp.tul.cz>
- 13 LENFELD, Petr. *Technologie II*. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 9788074943058.
- 14 GAJDOŠ, František. *Teorie tváření*. BRNO: Vysoké učení technické, 1987.
- 15 BABOR, Karel, Jan FIALA a Augustin CVILINEK. *Objemové tváření oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1967. Řada strojírenské literatury. ISBN 80-214-2854-9.
- 16 HOSFORD, William a Robert CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, XII, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

- 17 LANGE, Kurt. *Handbook of metal forming*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 1995. ISBN 0872634574.
- 18 *Mechanické vlastnosti oceli* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2510831/>
- 19 KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: Svazek 8. vydání první*. Praha: SCIENTIA, 1998, 255 s. ISBN 80-7183-054-2.
- 20 LENFELD, Petr. *Technologie II. 3. vyd.* Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 9788074943058.
- 21 NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0401-9.
- 22 FELDMANN, Heinz D. *Protlačování oceli: určeno pro technology a konstruktéry*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- 23 FOREJT, Milan. *Oborový projekt 2* [online]. BRNO: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2003 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory.htm>
- 24 FOREJT, Milan. *Vybrané statě z teorie tváření* [online]. BRNO: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2010 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory.htm>
- 25 MICHNA, Štefan a Nataša NÁPRSTKOVÁ. *Tváření*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2012. ISBN 9788074144455. LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 9788073611118.
- 26 HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan a PAŇÁK, Rudolf. *Strojírenská technologie 2. Díl 1, Polotovary a jejich technologičnost*. 2. upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. 316 s. ISBN 80-7183-244-8.
- 27 ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3. Díl 1, Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2000. 256 s. ISBN 80-7183-207-3.
- 28 *RBF Series 6 Station bolt former. Harbin Rainbow Technology CO., Ltd.* [online]. Harbin: Harbin Rainbow Technology CO., 2021, 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.rainbowtechnology.net/produc-details?product_id=52&brd=1
- 29 Rozměry předvrtaných otvorů pro závity. *Grumant nástroje vašeho úspěchu* [online]. Praha: Grumant, 2013 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.grumant.cz/storage/databank/Str%C3%A1nky/Soubory%20ke%20sta%C5%BEn%C3%AD/Rozm%C4%9Bry_p%C5%99edvrtan%C3%BDch_otvor%C5%AF_pro_z%C3%A1vity.pdf
- 30 *Tvářecí závitníky: metrická řada. Výroba řezných nástrojů a měřidel M&V velkoobchod nástroji, nářadím a stroji* [online]. Vsetín: M&V, 2021, 01/2013 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://zavitovani.cz/vyroba-vnitrnich-zavitu/tvareni-zavitu/>
- 31 *Výroba vnitřních závitů tváření: Výroba a technologie*. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha, 2001, 11.04.2001, (4) [cit. 2021-5-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-vnitrnich-zavitu-tvarenim>
- 32 CitacePRO [online]. [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Celková plocha	[mm ²]
a	Délka	[mm]
a ₀₋₅	Konstanty polynomu	[MPa]
A _j	Měrná přetvárná práce	[J mm ⁻³]
Al	Hliník	[-]
A _s	Střižná práce	[J]
B	Součinitel pro výpočet síly přidržovače	[-]
b	Tloušťka dna průtlačku	[mm]
BCC	Mřížka prostorově středěná	[-]
C	Uhlík	[-]
Cr	Chrom	[-]
Cu	Měď	[-]
D	Vnější průměr	[mm]
d	Vnitřní průměr	[mm]
dh	Změna výšky součásti	[mm]
d _o	Průměr čepu	[mm]
dt	Přírůstek času	[s]
dφ	Přírůstek logaritmické deformace	[s ⁻¹]
FCC	Mřížka stranově středěná	[-]
Fe	Železo	[-]
FeS	Sírník železnatý	[-]
h	Vztažná výška	[mm]
h ₀	Počáteční výška přechované části	[mm]
h _{hlava}	Výška šestihranu (hlavy)	[mm]
h ₁	Konečná výška přechované části	[mm]
HCP	Mřížka hexagonální	[-]
Mn	Mangan	[-]
N	Dusík	[-]
Ni	Nikl	[-]
P	Fosfor	[-]
R _e	Mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
S	Síra	[-]
S ₀	Počáteční plocha průmětu součásti	[mm ²]
S ₁	Obsah podstavy šestihranu	[mm ²]
S ₂	Obsah kruhu	[mm ²]
Si	Křemík	[-]

T	Teplota	[°C]
T_{krit}	Teplota kritická	[K]
T_{max}	Teplota maximální	[K]
T_{rek}	Teplota rekrystalizace	[K]
T_{tav}	Teplota tavení	[K]
V	Objem	[mm ³]
V	Vanad	[-]
v_0	Okamžitá rychlost pohybu nástrojem	[m.s ⁻¹]

Označení	Legenda	Jednotka
σ	Skutečné napětí	[MPa]
ε_{ef}	Efektivní přetvoření	[-]
ε_{p}	Pěchovací přetvoření	[-]
π	Konstanta	[-]
σ_{ef}	Efektivní napětí	[MPa]
σ_{l}	Hlavní napětí	[MPa]
σ_{d}	Deformační odpor	[MPa]
σ_{i}	Okamžité napětí	[MPa]
σ_{k}	Napětí na mezi kluzu	[MPa]
σ_{p}	Přetvárný odpor	[MPa]
σ_{p}	Přírozený přetvárný odpor	[MPa]
τ	Smykové napětí	[MPa]
φ	Logaritmické přetvoření	[-]
φ_{ef}	Efektivní přetvoření	[-]
φ_{Hpech}	Logaritmické přetvoření horní pěchování	[-]
φ_{prot}	Logaritmické přetvoření protlačení	[-]
φ_{Spech}	Logaritmické přetvoření spodní pěchování	[-]
P	Ukazatel stavu napjatosti dle Kolmogorova	[-]
ε	Poměrné přetvoření	[-]
$\varepsilon_{\text{Hpech}}$	Poměrné přetvoření při pěchování výpočtem z výšky polotovaru	[-]
ε_{mez}	Mezní deformace	[-]
$\varepsilon_{\text{prot}}$	Poměrné přetvoření při protlačování	[-]
$\varepsilon_{\text{Spech}}$	Poměrné přetvoření při pěchování výpočtem z průřezu polotovaru	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Fotografie ozubeného kola a čepu	7
Obr. 2 Pila ocaska PFS 710 A1	8
Obr. 3 Uložení ozubeného kola	8
Obr. 4 Ozubené kolo s čepem	8
Obr. 5 Model sestavy	8
Obr. 6 Rozměry součásti	8
Obr. 7 Třískové obrábění [9].....	10
Obr. 8 Kování součásti [10].....	10
Obr. 9 Schéma nástrojů v postupovém automatu [11].....	11
Obr. 10 Průběh vláken	12
Obr. 11 Diagram závislosti mechanickýh hodnot na deformaci [1].....	13
Obr. 12 Změna tvaru zrn tvářením [12].....	13
Obr. 13 Vliv teploty na mechanické vlastnosti [1].....	13
Obr. 14 Diagrami s výraznou a nevýraznou mezí kluzu [10].....	15
Obr. 15 Diagrami s výraznou a nevýraznou mezí kluzu [19].....	16
Obr. 16 Schéma dopředného protlačování [19].....	17
Obr. 17 Schéma zpětného protlačování [19].....	17
Obr. 18 Schéma sdruženého protlačování [19].....	17
Obr. 19 Schéma stranového protlačování [19].....	18
Obr. 20 Schéma napjatosti při přechování válcového tělesa [1].....	19
Obr. 21 Rozložení osového napětí dle Siebela [1].....	20
Obr. 22 Zpětné duté protlačování [1].....	22
Obr. 23 Zpětné protlačování [1].....	23
Obr. 24 Konstrukční provedení přechovníků [1].....	24
Obr. 25 konstrukce průtlačníku pro dopředné protlačování plných špalíků [1].....	25
Obr. 26 Konstrukce průtlačníku pro dopředné protlačování dutých součást [1]	25
Obr. 27 Příklady zapouzdřených průtlačnic pro dopředné protlačování [1].....	26
Obr. 28 Konstrukce průtlačnice pro dopředné protlačování [1].....	26
Obr. 29 Kontrukce průtlačníku pro zpětné protlačování [1].....	27
Obr. 30 Konstrukce průtlačnice pro zpětné protlačování [1].....	27
Obr. 31 Součásti čepového tvaru [2].....	31
Obr. 32 Součásti kalíškovitého tvaru [2].....	31
Obr. 33 Součásti rotační, simetrické s otvorem [2].....	32
Obr. 34 součásti nesymetrické [2].....	32
Obr. 35 Šestioperační tvářecí automat Harbin Rainbow Technology CO.,Ltd. [28].....	33
Obr. 36 Základní rozměry součásti	34
Obr. 37 Schéma tvařecích operací při výrobě pro variantu 1.....	35
Obr. 38 Schéma přetvoření napříč součástí pro variantu 1.....	36

Obr. 39 Schéma tvářecích operací při výrobě pro variantu 2.....	37
Obr. 40 Schéma přetvoření napříč součástí pro variantu 2.....	37
Obr. 41 Schéma tvařecích operací při výrobě pro variantu 3.....	38
Obr.42 Schéma přetvoření napříč součástí pro variantu 3.....	38
Obr. 43 Objemy součástí.....	39
Obr. 44 Detaily úkosů a rádiusů.....	39
Obr. 45 Rozměry pro operace stříhání, přechování a protlačování	40
Obr. 46 Rozměry pro operace protlačování a dvou přechování	41
Obr.47 Tabulka vypočetných hodnot odporů, sil a práce	43
Obr. 48 Křivky výsledných přetvárných odporů	49
Obr. 49 Stroj HATEBURCOLDMatic625	50
Obr. 50 Schéma uložení nástrojů	51
Obr. 51 Přechovník -schéma rozměrů	53
Obr. 52 Přechovník -schéma rozměrů	54

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli 13 320 5R. [5].....	9
Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 13 320 5R. [5].....	9
Tab. 3 Mezní hodnoty deformací při různých způsobech tváření. [1].....	14
Tab. 4 Parametry konstruktivní Johnson-Cookovy rovnice pro ocel 11 320 5R [4].....	21
Tab. 5 Doporučené parametry pro průtlačnici. [1].....	26
Tab. 6 Doporučené rozměry pro průtlačník. [1].....	27
Tab. 7 Materiály pro protlačovací nástroje [25].....	28
Tab. 8 Slinuté karbidy používané pro protlačování. [1].....	29
Tab. 9 Základní druhy ocelí používané k objemovému tváření. [1].....	30
Tab. 10 Parametry stroje HATEBUR COLDMatic625.....	50

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Ocel 11320 5R [5]
Příloha 2	Stroj COLDMatic 625
Příloha 3	Výpočet variant
Příloha 5	Výpočet dělicího poloměru průtlačnice

SEZNAM VÝKRESŮ

Čep ozubeného kola	DP_161938_00
Sestava nástroje	DP_161938_01
Pěchovník	DP_161938_02
Průtlačnice 1	DP_161938_03
Vyhazovací trn 2	DP_161938_04
Vyhazovací trn 2	DP_161938_K1
Vyhazovací trn 2	DP_161938_K2
Vyhazovací trn 2	DP_161938_K3

Ocel 11 320 5R

Materiál : Ocel obvyklých jakostí vhodná ke tváření za studena

Označení : ČSN 41 1320 dle chemického složení odpovídá oceli ČSN EN 10204 s úpravami dle podnikové normy PN 42 04 92 pro ocelové dráty kruhového průřezu od ϕ 1 do 20 mm, tažené za studena, (dále jen ocel 11 320 5R).

Význam dalších označení: 5- mořený, tažený, žíhaný naměkko, mořený a tažený s úběrem 5%
R- tažený v mýdlovém prášku

Zahraniční ekvivalenty -označení:

ISO	Cr01	ISO 17/12N49-69
DIN	St12	DIN 1623-72 (1.0320)
Rusko	08kp	GOST 9045-80
Švédsko	1142	SS 141142-75

Chemické složení v %:

	C %	Mn%	Si %	P %	S %	Al %	Cr %	Cu %
Atest dle ²⁾ ČSN EN 10 204	0,05	0,30	0,05	0,011	0,011	-	-	-
ČSN 41 1320 ¹⁾	Max 0,11	-	-	max. 0,045	max. 0,045	-	-	-
Spektrometr ³⁾ LECO GDS 750 *	0,05	0,33	0,06	0,017	0,012	0,027	0,16	0,06

Poznámky: ¹⁾ Lexikon technických materiálů
²⁾ Inspekční certifikát Železáren a drátoven Bohumín -ŽDB
³⁾ Certifikace ČSN/ISO 9003/ EN 29003 VUT FSI ÚMI v Brně

Polotovary: Tažený ocelový drát pro výrobu spojovacích součástí ϕ 15,5 mm

Mechanické vlastnosti dle ČSN EN 10204, certifikátu ŽDB Bohumín č.762/97 ²⁾

			11 320 5R
Mez kluzu	R _{p0,2}	MPa	-
Mez pevnosti	R _m	MPa	314
Tažnost	A ₅	%	-
Kontrakce	Z	%	78,4

Aktuální stav: tažený drát ϕ 15,5 mm, ocel 11 320 5R

Mechanické vlastnosti: (zkušební tyč dle ČSN 42 03 16) ³⁾

			11 320 5R
Mez kluzu	R _{p0,2}	MPa	589
Mez pevnosti	R _m	MPa	614
Tažnost	A ₅	%	15,2
Tvrdost		HV ₁₀	170
Kontrakce	Z	%	70,6
Modul pružnosti v tahu	E	GPa	201

Hollomonova aproximace tahové zkoušky

$$\sigma = k \cdot (\varphi)^n$$

$$k = 643,3 \text{ MPa}$$

$$n = 0,008$$

Výchozí struktura oceli 11 320 5R



Ocel 11 320 5R má feritickou strukturu a obsahuje globulární vměstky kyslíčnicku železa, křemíku a hliníku. Oxidy hliníku jsou často spojené se siričkem manganu. Struktura je rovnoměrná a má střední velikost zrna okolo 70 μm (minimální okolo 20 μm a

maximální okolo 200 μm). Cementit, terciální, se vyskytuje na hranicích zrn především v okolí trojných bodů. Střední tvrdost oceli je okolo $\text{HV}_{10}=170$.



Deformační dvojčata v okolí čela vzorku 3-5 při rychlosti dopadu 63,6 m/s



Mikrostruktura nezatíženého konce vzorku 3-5

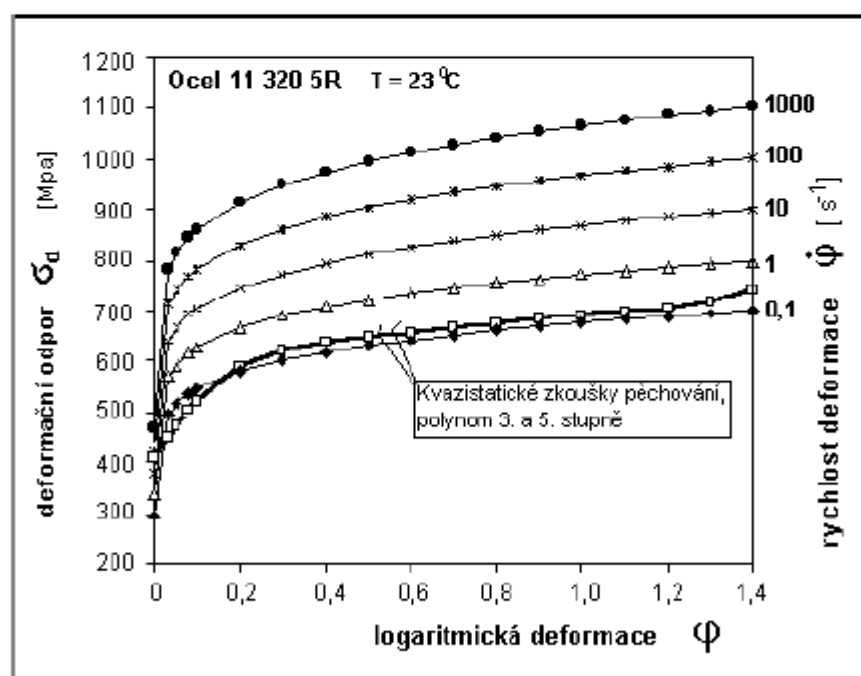


Ohyb deformačních dvojčat v okolí čela vzorku 3-6 při rychlosti dopadu 110,2 m/s.

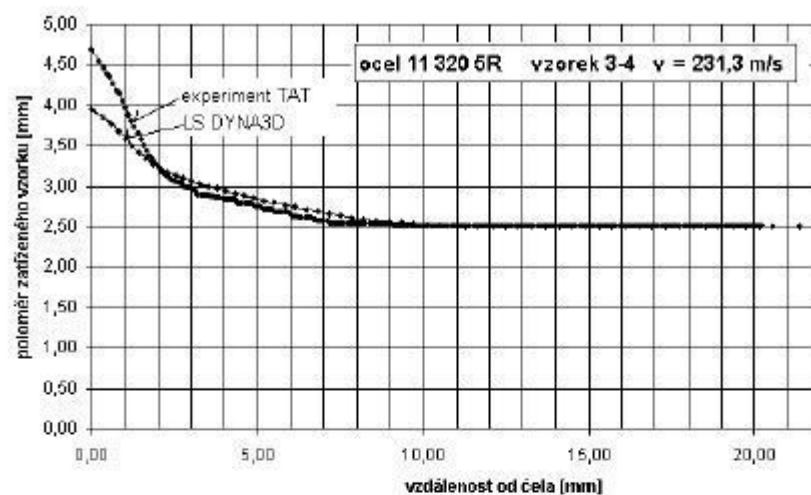


Plastická deformace se smykovými pásy povrchové vrstvy při rychlosti dopadu 231,8 m/s.

Parametry konstitutivní Johnson-Cook rovnice pro kompresní test	
σ_0	450
B	350
C	0,055
n	0,18
m	0,7



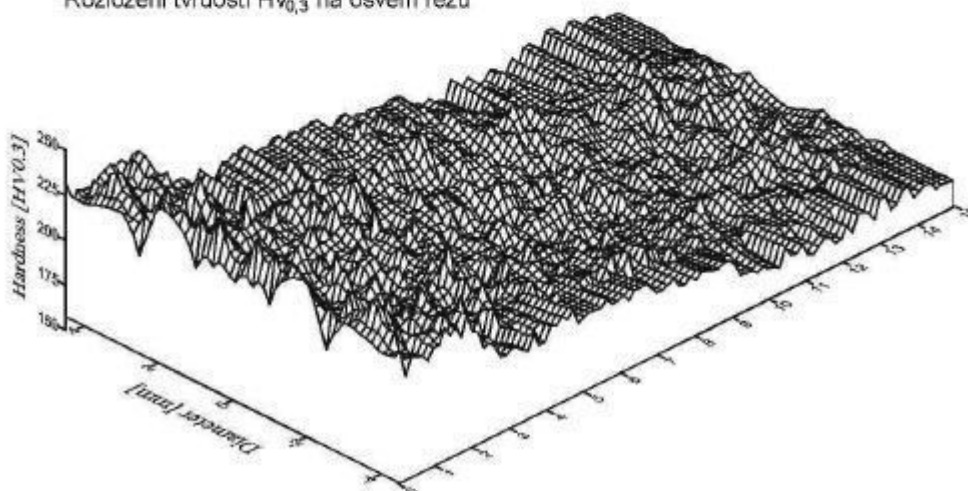
Křivky deformačních odporů (deformačních napětí) oceli 11 320 5R



Porovnání skutečného a simulovaného tvaru vzorku 3-4
po Taylorově kompresním testu

Ocel 11320 5R, vzorek 3-4, $v_0 = 231,3$ m/s

Rozložení tvrdostí $HV_{0,3}$ na osovém řezu



Rozložení tvrdostí $HV_{0,3}$ na osovém řezu vzorku 3-4

HATEBUR
HATEBUR-COLDmatic CM 625



COLDMATIC CM 625

Technical Data

HATEBUR

HATEBUR-COLDmatic CM 625

Coldmatic CM 625 Technical Data

Working ranges

Forming stations	6
Max. wire diameter at 600 N/mm ² tensile strength	20 (22) mm
Cut-off length	8-125 mm ^{*2}
Max. part length for transfer	130 mm
Max. outer diameter	32 mm ^{*1}

Performance

Strokes (continuously variable)	110-180 min ⁻¹ ^{*2}
Total press capacity	2500 kN
Press capacity per station	1000 kN
Drive motor	ca. 83 kW

Tools

Die diameter	80/90 (100) mm
Punch diameter	80 (90) mm

Strokes

Die ejector (continuously variable)	2-130 mm
Punch ejector (continuously variable)	18-52 mm

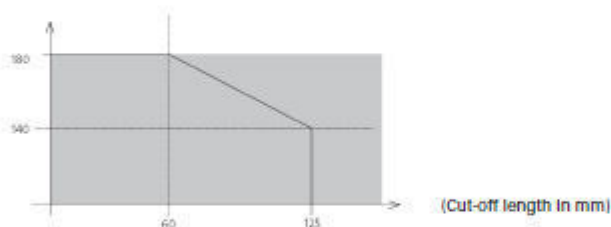
Dimensions and weights (machine with noise abatement cabin)

Length (incl. control cabinet)	6,800 mm
Width (incl. control cabinet)	4,150 mm
Height (without oil mist exhaust system)	2,890 mm
Feed line above ground	1,300 mm
Weight	60 t
Max. noise level (according to DIN 45635)	85 dB(A)

^{*1} For round parts made of steel, dependent on the forming degree, the sequence of operations, the material and temperature.

^{*2} Stroke rate reduction in the range of 140-180 min⁻¹ at a cut-off length of 60-125 mm.

(Stroke rate range in min⁻¹)



Příloha 3 Výpočet variant

str.1/1

R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
0. op	Dh	8,00	9,00	10,00	11,00	8,00	9,00				
	Dd1	8,00	9,00	10,00	11,00	8,00	9,00				
	Dd2	8,00	9,00	10,00	11,00	8,00	9,00	Dd22	10	8	9
	Dd3	8,00	9,00	10,00	11,00	8,00	9,00				
	d1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
1. op	Dh	8,80	9,10	10,20	11,10	8,80	9,10				
	Dd1	8,80	9,10	10,20	11,10	8,80	9,10				
	Dd2	8,80	9,10	10,20	11,10	8,80	9,10	Dd22	10,2	8,8	9,1
	Dd3	8,80	9,10	10,20	11,10	8,80	9,10				
	d1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
2. op	Dh	8,80	10,20	10,20	11,10	8,80	9,10				
	Dd1	8,80	10,20	10,20	11,10	8,80	9,10				
	Dd2	8,80	10,00	10,20	11,10	8,80	9,10	Dd22	10,2	8,8	9,1
	Dd3	8,80	8,00	10,20	11,10	8,80	9,10				
	d1	4,65	0,00	4,65	4,65	4,65	4,65				
3. op	Dh	8,80	10,20	10,20	11,10	8,80	9,10				
	Dd1	8,80	10,20	10,20	10,20	8,80	9,10				
	Dd2	8,80	10,00	10,00	10,00	8,80	9,10	Dd22	10	8,8	9,1
	Dd3	8,00	8,00	8,00	10,00	8,00	8,00	Dukos	8		
	d1	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65				
4. op	Dh	12,00	11,00	12,00	11,80	10,20	10,20				
	Dd1	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20				
	Dd2	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	Dd22	10	10	10
	Dd3	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	Dukos	7,5	8	8
	d1	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65				
5. op	Dh		12,00		12,00	12,00	12,00				
	Dd1		10,20		10,20	10,20	10,20				
	Dd2		10,00		10,00	10,00	10,00	Dd22		10	10
	Dd3		8,00		8,00	8,00	8,00	Dukos		7,5	7,5
	d1		4,65		4,65	4,65	4,65				

R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
6. op	Dh					12,00	12,00				
	Dd1					10,20	10,20				
	Dd2					10,00	10,00				
	Dd3					8,00	8,00				
	d1					4,65	4,65				
1. op	fi h	0,1906	0,0221	0,0396	0,0181	0,1906	0,0221				
	fi d1	0,1906	0,0221	0,0396	0,0181	0,1906	0,0221				
	fi d2	0,1906	0,0221	0,0396	0,0181	0,1906	0,0221	fid21	0,0396	0,1906	0,0221
	fi d3	0,1906	0,0221	0,0396	0,0181	0,1906	0,0221				
2. op	fi h	0,0000	0,2282	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
	fi d1	0,0000	0,2282	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
	fi d22	-0,3274	0,1886	-0,2330	-0,1930	-0,3274	-0,3026	fid21	0,0000	0,0000	0,0000
	fi d3	-0,3274	-0,2577	-0,2330	-0,1930	-0,3274	-0,3026				
3. op	fi h	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
	fi d1	0,0000	0,0000	0,0000	-0,1691	0,0000	0,0000				
	fi d22	0,0000	-0,2436	-0,0503	-0,2594	0,0000	0,0000	fid21	-0,0396	0,0000	0,0000
	fi d3	-0,2755	-0,4123	-0,6652	-0,2594	-0,2755	-0,3673				
4. op	fi h	0,6203	0,1510	0,3250	0,1223	0,2953	0,2282				
	fi d1	0,2953	0,0000	0,0000	0,0000	0,2953	0,2282				
	fi d22	0,3394	0,0000	0,0000	0,0000	0,3394	0,2478	fid21	0,0000	0,2557	0,1886
	fi d3	0,0000	0,0000	0,0000	-0,6149	0,0000	0,0000	fiDukos	-0,2020		
5. op	fi h		0,1740		0,0336	0,3250	0,3250				
	fi d1		0,0000		0,0000	0,0000	0,0000				
	fi d2		0,0000		0,0000	0,0000	0,0000	fid21		0,0000	0,0000
	fi d3		0,0000		0,0000	0,0000	0,0000	fiDukos		-0,2020	

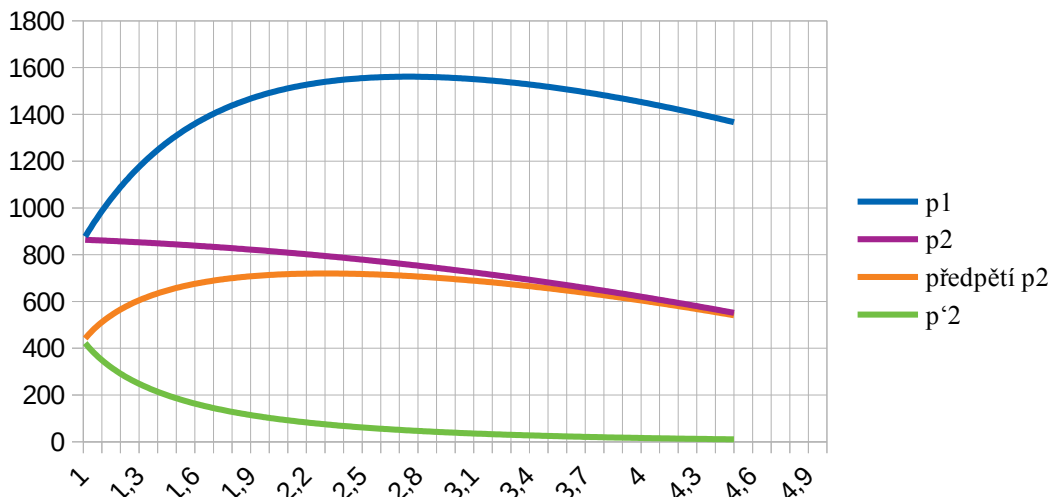
6. op	fi h					0,0000	0,0000				
	fi d1					0,0000	0,0000				
	fi d2					0,0000	0,0000				
	fi d3					0,0000	0,0000				
celkove	fi h	0,8109	0,5754	0,3646	0,1404	0,8109	0,5754				
	fi d1	0,4859	0,2503	0,0396	0,1872	0,4859	0,2503				
	fi d2	0,8575	0,4544	0,3228	0,4705	0,8575	0,5723	fid22	0,0792	0,4463	0,2107
	fi d3	0,7935	0,6920	0,9378	1,0854	0,7935	0,6920	fiDukos	1,1397	0,9955	0,8940

Příloha 5 Výpočet dělicího poloměru průtláčnice

str.1/2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	rozměry	r1	4,55		r1/2	r2	p ₁	p ₂	Δr ₂	Δr ₂₂	r22	2Δr _c	Δr _c	předpětí p ₂
2		r3	33,5		1,01	4,5955	877,381171	863,890586	-0,40278842	0,02566809	4,97262033	0,85691301	0,4284565	441,779001
3		T0	21		1,02	4,641	890,324598	863,560871	-0,20223239	0,0259274	4,81730499	0,45631957	0,22815979	450,984173
4	SK 64	E1	490000		1,03	4,6865	903,050486	863,227908	-0,13542456	0,02618687	4,7957377	0,32322286	0,16161143	459,761288
5		Rm1	1000		1,04	4,732	915,561986	862,891696	-0,10205402	0,02644649	4,80760753	0,25700101	0,12850051	468,143374
6		Rd1	3400		1,05	4,7775	927,862242	862,552236	-0,08205855	0,02670627	4,83285229	0,21752963	0,10876482	476,159834
7		sigmaD1	750		1,06	4,823	939,954391	862,209528	-0,06875075	0,02696662	4,86478455	0,1914339	0,09571695	483,836938
8		ni1	0,26		1,07	4,8685	951,841558	861,863571	-0,05926457	0,02722629	4,90053827	0,17298172	0,08649086	491,198244
9		alfa1	6,5E-06		1,08	4,914	963,526853	861,514366	-0,05216697	0,02748655	4,93868042	0,15930704	0,07965352	498,264944
10	19733	E2	207000		1,09	4,9595	975,01337	861,161912	-0,04666183	0,02774696	4,97841487	0,14881759	0,0744088	505,056163
11		Rm2	1480		1,1	5,005	986,304181	860,80621	-0,04227146	0,02800754	5,01926391	0,140558	0,070279	511,589212
12		Rp0,2	1390		1,11	5,0505	997,402338	860,447259	-0,03869186	0,02826829	5,06092357	0,1339203	0,06696015	517,879808
13		sigmaD2	1525		1,12	5,096	1008,31087	860,08506	-0,03572038	0,0285292	5,10319118	0,12849916	0,06424958	523,942254
14		ni2	0,3		1,13	5,1415	1019,03277	859,719613	-0,0332167	0,02879028	5,14592642	0,12401396	0,06200698	529,789608
15		alfa2	1,26E-05		1,14	5,187	1029,57102	859,350917	-0,0310806	0,02905153	5,18902908	0,12026426	0,06013213	535,433812
16		Tkal	920		1,15	5,2325	1039,92857	858,978973	-0,02923858	0,02931295	5,23242563	0,11710305	0,05855153	540,885823
17		Tpop	600		1,16	5,278	1050,10832	858,60378	-0,02763551	0,02957454	5,27606097	0,11442009	0,05721005	546,155711
18					1,17	5,3235	1060,11316	858,225339	-0,02622923	0,0298363	5,31989292	0,11213106	0,05606553	551,252753
19		beta s carou	0,8660254		1,18	5,369	1069,94593	857,843649	-0,02498694	0,03009824	5,36388869	0,11017036	0,05508518	556,185514
20		RM1/Rd1	0,29411765		1,19	5,4145	1079,60946	857,458711	-0,02388275	0,03036036	5,40802239	0,10848623	0,05424311	560,961917
21					1,2	5,46	1089,10652	857,070525	-0,02289596	0,03062266	5,4522733	0,10703723	0,05351861	565,589308
22					1,21	5,5055	1098,43986	856,67909	-0,02200978	0,03088514	5,49662464	0,10578982	0,05289491	570,074505
23	sigmap	937,5			1,22	5,551	1107,6122	856,284407	-0,02121049	0,03114779	5,54106269	0,10471656	0,05235828	574,423854
24	f2str	0,06			1,23	5,5965	1116,62619	855,886475	-0,02048676	0,03141063	5,58557612	0,10379478	0,05189739	578,643268
25	b	18,44			1,24	5,642	1125,48448	855,485295	-0,01982913	0,03167366	5,63015547	0,10300558	0,05150279	582,738267
26	D	9,1			1,25	5,6875	1134,18967	855,080867	-0,01922967	0,03193687	5,6747928	0,10233308	0,05116654	586,71401
27	d	4,65			1,26	5,733	1142,74432	854,67319	-0,01868166	0,03220027	5,71948139	0,10176386	0,05088193	590,575332
28	sigmar	932,359551			1,27	5,7785	1151,15095	854,262264	-0,01817937	0,03246386	5,76421551	0,10128646	0,05064323	594,326763
29	bez objímky	1 objímka	2 objímky		1,28	5,824	1159,41205	853,848091	-0,0177179	0,03272763	5,80899026	0,10089107	0,05044553	597,972563
30	sigma r	<1000	1000 – 1600	1600 – 2000	1,29	5,8695	1167,53007	853,430668	-0,01729301	0,03299116	5,85380141	0,10056923	0,05028462	601,516733
31					1,3	5,915	1175,50741	853,009998	-0,01690104	0,03325577	5,89864527	0,10031362	0,05015681	604,963044
32	D2	18,2	18,5		1,31	5,9605	1183,34645	852,586079	-0,01653879	0,03352013	5,94351867	0,10011783	0,05005892	608,315051

	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1	předpětí p ₂	p ₂	2Δr _c	Δr _c	2Δr _c + 0,05	Δr _c	T ₁	T ₂						
2	441,779001	422,111586	-0,83277383	-0,41638691	0,05133617113	0,00066809	840,346547	-329,848732	1800					
3	450,984173	412,576898	-0,43137561	-0,21568781	0,05185479928	0,0009274	875,3076	-295,963403	1600					
4	459,761288	403,46662	-0,29748486	-0,14874243	0,05237373331	0,00118687	887,737458	-283,916002	1400					
5	468,143374	394,748322	-0,23047865	-0,11523933	0,05289297623	0,00144649	894,169291	-277,682072	1200					
6	476,159834	386,392403	-0,19023166	-0,09511583	0,05341253104	0,00170627	898,140354	-273,833195	1000					
7	483,836938	378,37259	-0,16336822	-0,08168411	0,05393240073	0,0019662	900,864097	-271,19326	800					
8	491,198244	370,665327	-0,14415552	-0,07207776	0,0544525883	0,00222629	902,869246	-269,249807	600					
9	498,264944	363,249422	-0,12972684	-0,06486342	0,05497309676	0,00248655	904,423063	-267,7438	400					
10	505,056163	356,105749	-0,11848931	-0,05924466	0,0554939291	0,00274696	905,675184	-266,530207	200					
11	511,589212	349,216997	-0,10948705	-0,05474353	0,05601508832	0,00300754	906,715915	-265,521498	0					
12	517,879808	342,567451	-0,10211161	-0,0510558	0,05653657742	0,00326829	907,602986	-264,661721						
13	523,942254	336,142806	-0,09595722	-0,04797861	0,05705839939	0,0035292	908,375024	-263,913438						
14	529,789608	329,930005	-0,0907429	-0,04537145	0,05758055725	0,00379028	909,058849	-263,250654						
15	535,433812	323,917105	-0,08626785	-0,04313393	0,05810305398	0,00405153	909,673666	-262,654755						
16	540,885823	318,09315	-0,08238476	-0,04119238	0,05862589259	0,00431295	910,233587	-262,112061						
17	546,155711	312,448069	-0,07898307	-0,03949154	0,05914907607	0,00457454	910,749217	-261,612298						
18	551,252753	306,972586	-0,07597823	-0,03798911	0,05967260742	0,00483863	911,228674	-261,147592						
19	556,185514	301,658135	-0,07330439	-0,0366522	0,06019648965	0,00509824	911,678284	-260,711817						
20	560,961917	296,496794	-0,07090958	-0,03545479	0,06072072575	0,00536036	912,103045	-260,300126						
21	565,589308	291,481217	-0,06875215	-0,03437608	0,06124531871	0,00562266	912,506958	-259,908641						
22	570,074505	286,604585	-0,06679841	-0,0333992	0,06177027155	0,00588514	912,893266	-259,534219						
23	574,423854	281,860552	-0,06502072	-0,03251036	0,06229558725	0,00614779	913,264625	-259,174287						
24	578,643268	277,243207	-0,06339627	-0,03169814	0,06282126882	0,00641063	913,623227	-258,826718						
25	582,738267	272,747029	-0,06190603	-0,03095302	0,06334731925	0,00667366	913,970904	-258,489739						
26	586,71401	268,366857	-0,06053399	-0,03026699	0,06387374155	0,00693687	914,309191	-258,161861						
27	590,575332	264,097858	-0,05926659	-0,02963329	0,06440053871	0,00720027	914,639391	-257,841821						
28	594,326763	259,935501	-0,05809228	-0,02904614	0,06492771374	0,00746386	914,962611	-257,528546						
29	597,972563	255,875528	-0,05700115	-0,02850058	0,06545526962	0,00772763	915,279803	-257,221114						
30	601,516733	251,913936	-0,05598465	-0,02799232	0,06598320936	0,0079916	915,591785	-256,918732						
31	604,963044	248,046954	-0,05503535	-0,02751768	0,06651153597	0,00825577	915,899267	-256,62071						
32	608,315051	244,271028	-0,0541468	-0,0270734	0,06704025243	0,00852013	916,202868	-256,326451						



	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
95		1,94	8,827	1477,64306	819,330363	-0,01197172	0,05063317	8,78833855	0,12520978	0,06260489	710,082716	109,247647	-0,03591803	-0,01795902
96		1,95	8,8725	1480,08276	818,698545	-0,01198639	0,05091312	8,83357327	0,12579903	0,06289951	710,65435	108,044194	-0,03581437	-0,01790719
97		1,96	8,918	1482,47396	818,063478	-0,0120018	0,05119336	8,87880844	0,12639033	0,06319517	711,205542	106,857936	-0,03571245	-0,01785622
98		1,97	8,9635	1484,81734	817,425163	-0,01201792	0,0514739	8,92404401	0,12698364	0,06349182	711,736616	105,688547	-0,03561221	-0,0178061
99		1,98	9,009	1487,1136	816,7836	-0,01203471	0,05175474	8,96927997	0,12757889	0,06378944	712,247892	104,535708	-0,03551359	-0,01775679
100		1,99	9,0545	1489,3634	816,138788	-0,01205215	0,05203587	9,01451628	0,12817603	0,06408802	712,73968	103,399109	-0,03541653	-0,01770827
101		2	9,1	1491,56739	815,490728	-0,01207021	0,0523173	9,05975291	0,12877502	0,06438751	713,212283	102,278445	-0,03532099	-0,01766049
102		2,01	9,1455	1493,72623	814,83942	-0,01208888	0,05259903	9,10498985	0,12937581	0,0646879	713,665997	101,173422	-0,03522691	-0,01761346
103		2,02	9,191	1495,84054	814,184863	-0,01210811	0,05288106	9,15022706	0,12997835	0,06498917	714,101112	100,083751	-0,03513425	-0,01756712
104		2,03	9,2365	1497,91096	813,527057	-0,0121279	0,05316339	9,19546451	0,13058259	0,0652913	714,517909	99,0091488	-0,03504295	-0,01752147
105		2,04	9,282	1499,93808	812,866004	-0,01214822	0,05344603	9,24070219	0,13118851	0,06559425	714,916663	97,9493409	-0,03495297	-0,01747649
106		2,05	9,3275	1501,9225	812,201701	-0,01216905	0,05372897	9,28594008	0,13179605	0,06589802	715,297643	96,9040582	-0,03486428	-0,01743214

	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
95	819,330363	-0,01197172	0,05063317	8,78833855	0,12520978	0,06260489	710,082716	109,247647	-0,03591803	-0,01795902	0,10126633471	0,02563317	935,508544	-237,614796
96	818,698545	-0,01198639	0,05091312	8,83357327	0,12579903	0,06289951	710,65435	108,044194	-0,03581437	-0,01790719	0,10182623978	0,02591312	935,85601	-237,278021
97	818,063478	-0,0120018	0,05119336	8,87880844	0,12639033	0,06319517	711,205542	106,857936	-0,03571245	-0,01785622	0,10238672964	0,02619336	936,205118	-236,939655
98	817,425163	-0,01201792	0,0514739	8,92404401	0,12698364	0,06349182	711,736616	105,688547	-0,03561221	-0,0178061	0,10294780729	0,0264739	936,555872	-236,599693
99	816,7836	-0,01203471	0,05175474	8,96927997	0,12757889	0,06378944	712,247892	104,535708	-0,03551359	-0,01775679	0,10350947572	0,02675474	936,908276	-236,258132
100	816,138788	-0,01205215	0,05203587	9,01451628	0,12817603	0,06408802	712,73968	103,399109	-0,03541653	-0,01770827	0,10407173793	0,02703587	937,262336	-235,914967
101	815,490728	-0,01207021	0,0523173	9,05975291	0,12877502	0,06438751	713,212283	102,278445	-0,03532099	-0,01766049	0,10463459693	0,0273173	937,618054	-235,570193
102	814,83942	-0,01208888	0,05259903	9,10498985	0,12937581	0,0646879	713,665997	101,173422	-0,03522691	-0,01761346	0,10519805571	0,02759903	937,975437	-235,223808
103	814,184863	-0,01210811	0,05288106	9,15022706	0,12997835	0,06498917	714,101112	100,083751	-0,03513425	-0,01756712	0,10576211726	0,02788106	938,334486	-234,875806
104	813,527057	-0,0121279	0,05316339	9,19546451	0,13058259	0,0652913	714,517909	99,0091488	-0,03504295	-0,01752147	0,1063267846	0,02816339	938,695206	-234,526185
105	812,866004	-0,01214822	0,05344603	9,24070219	0,13118851	0,06559425	714,916663	97,9493409	-0,03495297	-0,01747649	0,10689206071	0,02844603	939,057601	-234,174941
106	812,201701	-0,01216905	0,05372897	9,28594008	0,13179605	0,06589802	715,297643	96,9040582	-0,03486428	-0,01743214	0,1074579486	0,02872897	939,421673	-233,822071